

Diplomová práce

Vliv rychlosti tažení na únavové vlastnosti ocelových drátů pro lana

Influence of drawing speed on fatigue properties of steel wires for  
ropes

Jméno autora: Jakub Molnár

Rok odevzdání: 2021

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu práce doc. Ing. Richardu Fabíkovi, Ph.D. a konzultantům Ladislavu Trojáčkovi, Ing. Richardu Pěluchovi a Ing. Marku Machetanzovi za odborné vedení a pomoc, cenné rady a připomínky, ochotu a čas, který mi poskytovali po celou dobu zpracovávání diplomové práce. Moje poděkování patří také manželce a rodině za trpělivost a podporu během tvorby této diplomové práce i po celou dobu studia.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá vlivem rychlosti tažení holého fosfátovaného drátu pro ocelová lana na únavu materiálu, zásobu plasticity a rychlost zpevňování. Pro tento experiment byly vybrány jakosti drátu C68DP s pevností v tahu 1 570 MPa a C86D2 s pevností v tahu 2 160 MPa. Dráty těchto jakostí byly taženy rychlostí 6, 8 a 10 m/s. V rámci provozního experimentu byly získány vzorky drátu po tažení za studena. Tyto vzorky byly použity pro zkoušku únavy na stroji Schenck PUL N, pro zkoušku tahem, ohybem a krutem. Analýzou naměřených hodnot jsme prokázali, že pro zvýšení hodnot pevnosti, by byla vhodná nejvyšší zkoušená rychlost tažení 10 m/s. Pro vyšší únavovou odolnost by však byla vhodná nejnižší zkoušená rychlost 6 m/s. U obou jakostí ocelí C68DP a C86D2 byl největší počet cyklů do lomu a zároveň nejmenší rozpětí naměřených hodnot zjištěn u rychlosti 6 m/s.

### **Klíčová slova**

Dráty pro ocelová lana, jakost C68DP, jakost C86D2, rychlost tažení drátu, zkouška únavy, Schenck PUL N, krabicový graf

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the influence of the drawing speed of bare phosphated wire for steel ropes on material fatigue, the storage of plasticity and the rate of strengthening. C68DP wire grades with ultimate tensile stress 1 570 MPa and C86D2 wires with ultimate tensile stress 2 160 MPa were selected for this experiment. Wires of these grades were drawn at speeds of 6, 8 and 10 m/s. In a field experiment, wire samples were obtained after cold drawing. These specimens were used for fatigue testing on a Schenck PUL N machine, for tensile, bending and torsion testing. By analyzing the measured values, we have shown that to increase the strength values, the highest tested drawing speed of 10 m/s would be recommended. For higher fatigue resistance, the lowest tested speed of 6 m/s would be recommended. For both qualities C68DP and C86D2, the largest number of cycles to fracture and at the same time the smallest range of measured values were found at a speed of 6 m/s.

### **Keywords**

Wires for steel ropes, quality C68DP, quality C86D2, wire, wire drawing speed, fatigue test, Schenck PUL N, box chart

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Představení ŽDB Bohumín .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Teorie tažení drátu.....</b>	<b>9</b>
3.1	Nástroje pro tažení.....	10
3.1.1	Průvlak a jeho rozdělení.....	10
3.1.2	Tažné stolice, drátotahy .....	15
3.1.3	Tažné stolice pro tandemové tažení .....	15
3.1.4	Tažná stolice pro jednoduché tažení .....	16
3.1.5	Pomocné vybavení .....	17
3.2	Analýza napjatosti v průvlaku .....	17
3.3	Důsledky napjatosti v deformačním pásmu z technologického hlediska .....	19
3.4	Vliv parametrů při tažení .....	21
3.4.1	Vliv mazání .....	21
3.4.2	Vliv rychlosti tažení .....	23
3.4.3	Vliv povrchu – povrchové úpravy.....	23
3.4.4	Vliv geometrie pracovní části – delta faktor .....	23
<b>4</b>	<b>Únavové vlastnosti ocelí.....</b>	<b>24</b>
4.1	Historie .....	24
4.2	Oblasti únavového zatěžování .....	25
4.3	Zátěžný cyklus .....	25
4.4	Etapy únavového života.....	28
4.4.1	Stádium mechanických změn.....	28
4.4.2	Stádium nukleace únavových trhlin .....	29
4.4.3	Stádium šíření trhlin .....	29
4.5	Křivky únavového života.....	30
4.5.1	Wöhlerova křivka (S-N křivka) .....	30

4.5.2	Manson – Coffinova křivka $\epsilon_a - N_f$ .....	33
4.6	Faktory ovlivňující mez únavy .....	35
4.6.1	Vliv středního napětí .....	35
4.6.2	Vliv druhu zatěžování .....	37
4.6.3	Vliv velikosti součásti .....	37
4.6.4	Vliv vrubů .....	38
4.6.5	Vliv stavu povrchu .....	38
<b>5</b>	<b>Technologie tažení za studena a zkoušení únavových vlastností ocelových drátů pro lana v ŽDB Bohumín.....</b>	<b>40</b>
5.1	Technologie tažení za studena .....	40
5.2	Zkoušení únavových vlastností – Schenck PUL N.....	42
5.2.1	Rozsah použití .....	42
5.2.2	Konstrukční řešení stroje.....	42
5.2.3	Návod pro obsluhu .....	43
<b>6</b>	<b>Cíle práce .....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Návrh experimentu .....</b>	<b>46</b>
7.1	Použitý materiál .....	46
7.1.1	Použité oceli .....	46
7.1.2	Přehled mechanických vlastností použitých ocelí.....	47
7.2	Popis experimentu .....	48
7.2.1	Výrobní postup experimentu .....	48
7.2.2	Detailní popis tažení finálního drátu. ....	48
7.2.3	Rozdělení a odběr zkušebních vzorků.....	50
7.2.4	Zkouška únavy .....	51
<b>8</b>	<b>Diskuze výsledků .....</b>	<b>57</b>
8.1	Krabicový graf.....	57
8.2	Tažený drát z jakosti C68DP .....	58

8.2.1	Data a popisná statistika mechanických vlastností a zkoušek .....	58
8.2.2	Data a popisná statistika únavových vlastností .....	66
8.3	Tažený drát z jakosti C86D2 .....	68
8.3.1	Data a popisná statistika mechanických vlastností a zkoušek .....	68
8.3.2	Data a popisná statistika únavových vlastností .....	76
8.4	Srovnání mezi jakostmi C68DP a C86D2 .....	78
<b>9</b>	<b>Závěr a provozní doporučení .....</b>	<b>81</b>
9.1	Drát jakosti C68DP s pevností 1 570 MPa .....	81
9.2	Drát jakosti C86D2 s pevností 2 160 MPa .....	81
9.3	Srovnání drátů jakostí C68DP a C86D2 .....	82
9.4	Doporučená rychlost tažení .....	82
	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>84</b>

# 1 Úvod

Tažený drát je nezbytnou součástí dnešní moderní doby. S taženými dráty se setkáváme v různých průmyslových odvětvích od automobilových, leteckých až po šroubářenské. Historie tažení drátu se datuje na počátek našeho letopočtu, kde v roce 1923 byly v Africe nalezeny primitivní průvlaky staré zhruba 2000 let. V Evropě se první zmínky tažení drátu datují k 5. století našeho letopočtu, kdy byla také objevena první tažná železa (průvlaky) [1, 2].



**Obr. 1** Tažení drátu na houpačce [3]



**Obr. 2** Tažení drátu přešlapujícím tažcem [3]

Nicméně až ve 12. století se objevuje první psaná informace, kdy v Theopilově spisu „De Diversis Artibus“ najdeme popis technologie tažení přes plochá tažná železa, ve kterých bylo několik tažných otvorů. Tento způsob se používal až do 30. let 19. století. Značná změna začala ve 13. století, kdy se k tažení drátu začaly používat dva bubny. Toto tažení bylo podstatně rychlejší a nebylo tak fyzicky náročné. Konec drátu se provlékl železnými tažnými deskami (průvlakem) a zaklesl se do bubnů. Následně se otáčelo klikou a drát se navíjel na buben. Nevýhoda této technologie byla, že drát byl lokálně zadřený a pomačkaný. V roce 1820 došlo k razantnímu zlepšení kvality s nástupem drátotahů. Od tohoto roku začal rozmach v oboru tažení drátů [1, 3]. V současnosti je jednou z největších tuzemských firem vyrábějících tažený drát ŽDB drátovna, která je členem společnosti Třinecké železářny. V tomto podniku bude probíhat praktická část této diplomové práce. **Cílem této diplomové práce je zjistit a popsat vliv rychlosti tažení drátu pro ocelová lana na únavě materiálu, zásobu plasticity a rychlost zpevňování.**

## 2 Představení ŽDB Bohumín

Podniková historie sahá až do roku 1885, kdy byla Albertem Hahnem a Heinrichem Eisnerem založena v Bohumíně rourovna. V průběhu dalších let se přidávaly další provozovny a nové produkty. Např. v roce 1888 byla spuštěna slévárna, která se zabývala výrobou litinových radiátorů. Následně v roce 1896 přibyla v sousedství drátovna společnosti Moravskoslezská a.s., kde se od roku 1906 vyráběl pozinkovaný drát. Dále v roce 1913 přibyla produkce ocelových a měděných lan a v roce 1927 byla zahájena výroba patentovaného drátu. Po znárodnění v roce 1945 pokračoval další rozvoj výroby, kde v roce 1949 byla zavedena výroba drátu martenzitické oceli, zahájení výroby pružin a jehel [4].



**Obr. 3** Historická fotografie ŽDB Bohumín [5]

V roce 1958 byly oba doposud samostatné podniky rourovna se slévárnou spojeny se společností Moravskoslezská a.s. do jednoho, který nesl název Železářny a drátovny Bohumín. V roce 1960 byl otevřen nový provoz pro výrobu patentovaného drátu. Na počátku roku 1978 byla zavedena výroba ocelových kordů a patních lanových kordů do pneumatik. V roce 1988 byl podnik transformován na státní podnik Železářny a drátovny Bohumín, kde téměř veškeré jmění bylo v roce 1993 převedeno na Fond národního majetku ČR. Na základě majetku původní firmy byla v roce 1993 založena akciová společnost ŽDB a.s. Postupem času začíná rozprodej podniku, kdy v roce 2000 byl vyčleněn závod na výrobu železničních dvojkolí společnosti Bonatrans. V roce 2003 byl zbytkový podnik dán do likvidace, kde zanikl. V roce 2003 proběhlo rozdělení podniku na 5 dílčích závodů (závod Drátovna tažírna patentovaného drátu, závod Drátovna tažírna nepatentovaného drátu, závod Drátovna lanárna, závod Drátovna ocelové kordy a závod Drátovna pérovna a průvlakárna). V roce 2005 byla založena společnost ŽDB GROUP a.s., která zanikla v roce 2012. Od 1. října 2012 do současnosti je společnost ŽDB Drátovna a.s. novou dceřinou společností Třineckých železáren – Moravia Steel [4].



### 3 Teorie tažení drátu

Tažení drátu nebo tyčové oceli nejčastěji kruhového průřezu probíhá skrz otvor průvlatu. Během tohoto procesu dochází k redukci průřezu drátu a zároveň k jeho prodloužení plastickou deformací. Plastická deformace musí při tažení probíhat za takových teplot a deformací, aby nedocházelo k uzdravovacím procesům tváření a docházelo tak k požadovanému zpevnění oceli. Základní zákon, který musí při tažení platit, a který známe i z jiných oblastí tváření, je zákon o zachování objemu taženého drátu nebo tyčové oceli procházející průvlakem za časovou jednotku:

$$S_0 \cdot l_0 = S_1 \cdot l_1 = S_2 \cdot l_2 \quad (1)$$

$$S_0 \cdot v_0 = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (2)$$

kde:

$S_{0,1,2}$  – průřezy [mm],

$l_{0,1,2}$  – délky [mm],

$v_{0,1,2}$  – rychlost tažení [m · s<sup>-1</sup>].

Porušením tohoto zákona dochází k porušení (přetržení) taženého drátu. V průběhu tažení drátu skrz průvlak je nástrojem deformace kuželovitá část se vstupním úhlem  $2\alpha$ . Účinkem vnější tahové síly  $F$  působí příčná síla  $Q$  v kuželovité části průvlatu. V průvlakem vzniká pásmo deformace o délce  $l$ . Na **obr. 4** si můžeme všimnout, že z trojúhelníku se dá určit základní rovnice, kde příčná síla je značena jako  $Q$  a tahová síla jako  $F$ .

$$F = Q \cdot \sin (\alpha + \rho) \quad (3)$$

$$F = N \cdot \operatorname{tg} (\alpha + \rho) \quad (4)$$

kde:

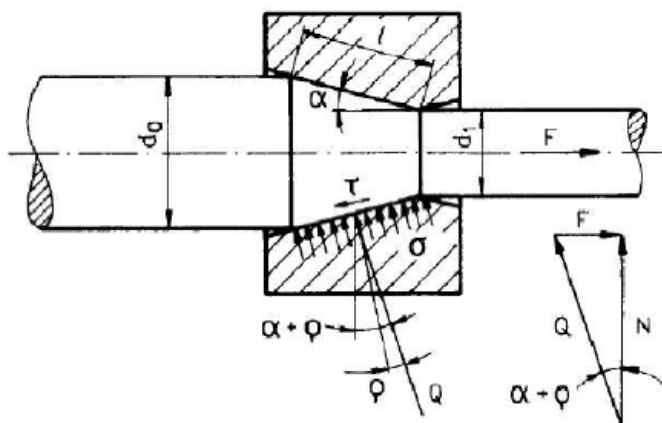
$d_0$  – vstupní průměr [mm],

$d_1$  – výstupní průměr [mm],

$2\alpha$  – úhel tažné části průvlatu,

- $\rho$  – třecí úhel,
- $\tau$  – smykové napětí,
- $\sigma$  – střední tahové napětí,
- $F$  – tahová síla,
- $Q$  – příčná síla.

Vstupní úhel  $2\alpha$  se nejčastěji pohybuje v rozmezí  $10^\circ$  až  $20^\circ$ . Koeficient tření  $\mu = \tan \rho$  mívá při efektivním mazání hodnoty pod 0,05 ( $\rho < 3^\circ$ ). Velikost příčné síly  $Q$  tedy dosahuje 4 až 7násobku hodnoty tahové síly  $F$  [6, 7].

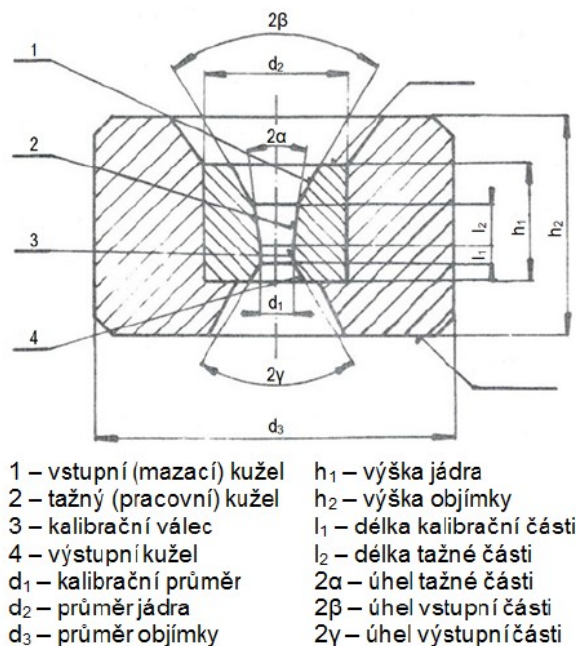


**Obr. 4** Průvlak – rozložení sil [1]

### 3.1 Nástroje pro tažení

#### 3.1.1 Průvlak a jeho rozdělení

Nástroj pro tažení drátu a tyčí nazýváme průvlak. Průvlak musí být zkonstruován tak, aby zajistil požadovanou vnitřní i povrchovou jakost v taženém polotovaru (mechanické vlastnosti, rozměrovou přesnost, kvalitu povrchu, strukturu). Konstrukce průvlaku určuje ekonomiku tažení výroby a dále ovlivňuje efektivnost procesu tažení a opotřebení průvlaku. Průvlak se skládá ze dvou částí: jádra a objímky. Řez tažným průvlakem si můžeme prohlédnout níže na **obr. 5** [8].



**Obr. 5** Řez tažným průvlakem [9]

Z **obr. 5** je patrné, že otvor v průvlaku se rozděluje na čtyři části.

První část se nazývá mazací kužel. Hlavní úlohou mazacího kužele je transportovat mazivo do deformační části. Velikost mazacího úhlu  $2\beta$  závisí na typu výrobku, který je tažen. Dále zaleží na způsobu mazání. Při využití tuhých maziv je velikost úhlu  $2\beta$  přibližně  $40^\circ$  až  $60^\circ$ . Pokud využíváme k mazání kapalná maziva, tak velikost úhlu  $2\beta$  je v rozpětí  $60^\circ$  až  $90^\circ$ . Délka mazacího kužele závisí na typu výrobku a zajištění řádných podmínek mazání. Obvyklá délka je v rozsahu 2,5 mm až 7,0 mm.

Druhá část průvlaku je část pracovní. V pracovní části dochází k plastické deformaci, a tedy ke změně průměru. Velikost tažného úhlu  $2\alpha$  je podmíněna délkou pracovní části  $l_2$ . Platí, že čím menší je úhel  $2\alpha$ , tím větší je délka  $l_2$ , což je dáno vztahem:

$$\operatorname{tg} \alpha = d_0 - d_1 / 2l_2 \quad (5)$$

kde:

$d_0$  – vstupní průměr [mm],

$d_1$  – výstupní průměr [mm],

$\operatorname{tg} \alpha$  – tangenta úhlu pracovní části.

Obecně platí, že čím tvrdší je materiál, tím volíme menší tažný úhel. U vysokouhlíkových ocelí je úhel  $\alpha$   $4^\circ$  až  $6^\circ$  a u nízkouhlíkových ocelí je to  $9^\circ$  až  $12^\circ$ .

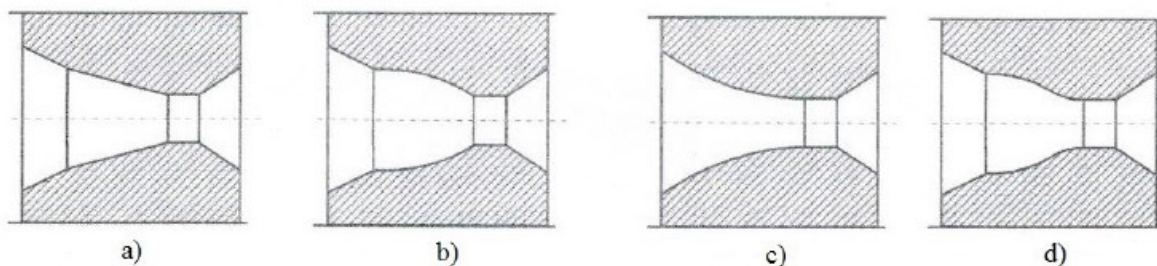
Třetí částí je kalibrační válec. V kalibračním válci vzniká konečný tvar a požadovaný průměr taženého materiálu. Tato část je charakterizována průměrem  $d_l$  a délkou kalibračního válce  $l_l$ . V případě, kdy by délka  $l_l$  byla příliš malá, došlo by k rychlému opotřebení kalibrační části. Při příliš velké hodnotě délky  $l_l$  se naopak tření zvyšuje a může tak dojít k poškrábání tažené tyče. Obecně platí, že čím menší je průměr  $d_l$ , tím menší je hodnota délky  $l_l$  a poměr  $l_l/d_l$  roste.

Poslední čtvrtou částí je výstupní kužel. Výstupní kužel v porovnání s předchozími částmi průvlatku nehraje v procesu tažení příliš významnou roli. Hlavním účelem výstupního kužele je zabezpečit ochranu kalibrační části. Výstupní úhel  $2\gamma$  se pohybuje v mezích hodnot  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  nebo  $45^\circ$  [10].

Průvlatky lze dělit podle:

- materiálu jádra
- tvaru pracovní plochy

Na **obr. 6** si můžeme prohlédnout rozdělení průvlatků dle pracovní plochy [11].



**Obr. 6** Tvary průvlatků a) kuželový, b) vydutý, c) radiální, d) sigmoidální [12]

V současnosti se při tažení oceli nejvíce používají tvrdokovové (na bázi slinutých karbidů WC) průvlatky s kuželovým tvarem deformačního pásma. Pro malé průměry drátu až do 0,5 mm se v některých průmyslových zemích používají průvlatky z přírodního diamantu. V České republice jsou používány zásadně tvrdokovové průvlatky od průměru 0,15 mm výše. Při tažení neželezných kovů jako jsou hliník a měď se využívají přírodní nebo syntetické diamantové průvlatky. Podle prováděných experimentů výsledky ukazují, že nejmenších tažných sil se

dosahuje kuželových průvlacích a nejmenší míry nehomogenity deformace dochází v sigmoidálních průvlacích [11].

Jak už jsme si řekli, tak průvlaky dále rozdělujeme podle materiálu jádra na průvlaky:

### 1) Průvlaky ze slinutých karbidů – TKP

Slinuté karbidy jsou směsi vytvořené z jemných zrněk karbidů kovů s vysokou teplotou tavení. Hlavními složkami jsou karbidy titanu, wolframu a jako pojivo se používá kobalt. Tato zrnka s pojivem jsou spojena metodou slinování. Někdy se používají také karbidy tantalu, chromu, niobu a u pojiva se místo kobaltu používá také nikl nebo železo. Složky karbidu dodávají jádru otěruvzdornost a tvrdost, zatímco pojící kov (kobalt nebo nikl či železo) pevnost a houževnatost. Z důvodů zvýšení životnosti průvlaků se v současnosti využívá povrchová úprava prostřednictvím difúzních pochodů, a to nanášením vrstev titanu, bóru a rovněž nanokrystalické kompozitní diamantové vrstvy. Na **obr. 7** je zobrazen jeden z tvrdokovových průvlaků.



**Obr. 7** Tvrdokovový průvlak

### 2) Průvlaky diamantové – MCD, PCD

#### *a) Průvlaky z přírodních diamantů*

Průvlaky z přírodních diamantů se označují zkratkou MCD (monokrystalické diamanty). V přírodních nalezištích můžeme zaznamenat tři formy diamantu nazývané Ballas, Bort a Carbon. Pro výrobu průvlaků se nejčastěji používají diamanty Bort, které charakterizuje vysoká jakost a kruhový tvar. Velikost krystalu udává průměr taženého drátu a zpracovávanému materiálu. Z ekonomického hlediska využíváme ty krystaly, jejichž velikost

je jen o něco málo větší než zpracovávaný průměr drátu. A také, aby šlo průvlak přeštit. Diamant je velmi křehký, a dokonce nejtvrdší za známých materiálů (dle Mohsovy stupnice má tvrdost 10). Specifickou hmotnost určuje struktura krystalu, množství a velikost vměstků a má hodnotu přibližně 3,5 g/cm. Přírodní diamant obsahuje pravidelnou kubickou krystalovou strukturu. Charakterizují jej tři svislé osy, které mají stejnou délku, ale má i osy a roviny souměrnosti vedoucí k pravidelným šestistěnným nebo kubickým tvarům. Vyskytuje se také ve tvaru oktaedru nebo kosočtverečném tvaru dvanáctistěnu. Může také být kombinací uvedených typů krystalů. Na **obr. 8** jsou zobrazeny jádra průvlaku MCD.



**Obr. 8** Jádro průvlaku MCD [1]

#### ***b) Průvlaky ze syntetických diamantů***

Průvlaky ze syntetických diamantů se označují zkratkou PCD (polykrystalické diamanty). Tyto průvlaky se nejdříve využívaly k tažení neželezných a potom také ocelových drátů. Dnes se používají pro tažení neželezných drátů v rozsahu od 0,15 do 15 mm. Průvlaky vykazují minimální ovalitu drátu, který prošel přes průvlak. Dále disponují výbornou jakostí povrchu. Tyto průvlaky se v určitých případech osvědčily jako cenově efektivnější, než průvlaky z přírodních diamantů nebo slinutých karbidů. Cena diamantových průvlaků je výrazně vyšší než cena průvlaků ze slinutých karbidů. Proto se využívají jen v určitých případech. Na **obr. 9** jsou zobrazeny PCD průvlaky [6].



**Obr. 9** Průvlaky PCD [1]

### **3) Keramické průvlaky**

Průvlaky z keramiky mají výbornou tvrdost, díky které jsou schopny odolávat velkým napětím. Dále disponují výbornou odolností proti otěru, nízkou náročností na údržbu a vysokou docílenou kvalitou povrchu drátu protaženého průvlakem. Výroba keramických průvlaků probíhá slinováním, kde se následně povrch průvlaku musí zbrousit brusným diamantovým kotoučem.

### **4) Průvlaky z nástrojové oceli**

Průvlaky z nástrojové oceli se využívají především v malosériové výrobě a při nižších redukcích, které nepřekračují 20 %. Pokud bychom chtěli redukci zvýšit, tak by se musela snížit tvrdost oceli na 60 až 58 HRC, aby se předešlo vzniku lomu na průvlak. Tvrdost průvlaku nástrojové oceli disponuje tvrdostí 62 až 64 HRC [1, 11].

#### **3.1.2 Tažné stolice, drátotahy**

Stroje pro tažení drátu označujeme termínem tažné stolice či drátotahy.

Rozděluje je podle:

- počtu průchodů průvlaků (jednoduché stroje a tandemové stroje)
- použití maziva (stroje pro suché nebo mokré tažení)
- způsobu tažení drátů a tyčí (stolice s přímočarým pohybem řetězové nebo poháněné dvěma desmodronickými vačkami na hlavním hřídeli)

#### **3.1.3 Tažné stolice pro tandemové tažení**

Tandemové tažné stolice se využívají při procesech, kde dochází k velké redukci materiálu. Výhodou těchto stolic je, že mají využití pro všechny typy tažení a využívají se zde všechny typy mazání. Tyto stolice obsahují hned několik průvlaků, proto je označujeme jako víceprůvlakové.

Tyto víceprůvlakové stolice rozdělujeme podle:

- umístění tažného bubnu na vertikální a horizontální,
- dráhy drátu na stolice s přímým pohybem, nebo na stolice typu tažení přes „závěsné kladky“. Stolicí s přímým pohybem je zobrazena na **obr. 10**.

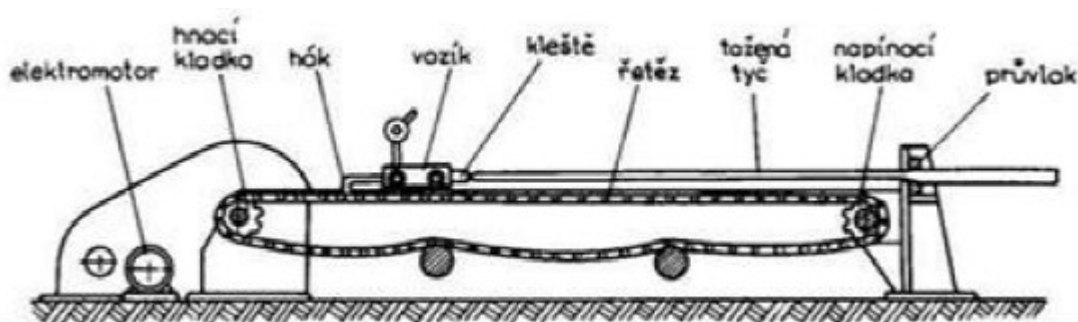
Vertikální tažné stolice používají jen suché mazivo, proto se zde uplatňuje tažení bez prokluzu. Drátotahy pro přímé tažení drátu zajišťují lepší tažnost, nižší tření, snížení nutnosti zásahu obsluhy stroje do procesu tažení, velkou variabilitu použitých průvlaků, vyšší produktivitu díky vysokým tažným rychlostem, velmi dobrou efektivitu chlazení, jednoduchou obsluhu stroje a vysokou kvalitu povrchu finálního výrobku.



**Obr. 10** Tažná stolice s přímým pohybem [13]

### 3.1.4 Tažná stolice pro jednoduché tažení

Tyto stolice se využívají především pro tažení tyčí větších průměrů z důvodu nutnosti vysokých tažných sil. Elektrický pohon se využívá u vyšších rychlostí, které jsou i tak nižší, než u bubnových tažných stolic (cca 30 - 100 m·min<sup>-1</sup>), a v případě menších redukcí. Velkou výhodou těchto typů strojů pro jednoduché tažení je velmi jednoduchá kalkulace vstupních parametrů. Na **obr 11** je zobrazena přímočará tažná stolice. Vozík s kleštěmi, který je umístěn na lyžinách rámu, táhne tyč nebo drát přes průvlak. Vozík je poháněn hnací tažnou kladkou, která je poháněna elektricky.



**Obr. 11** Přímočará tažná stolice [9]



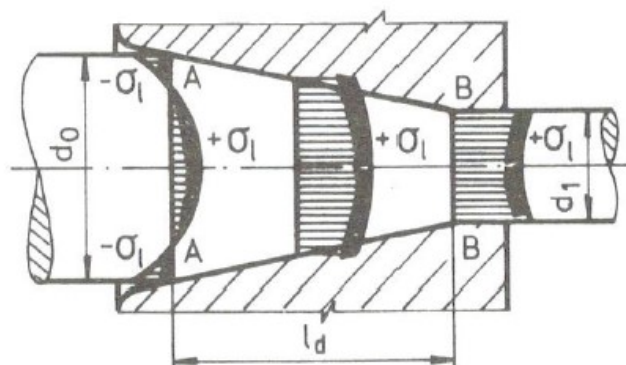
### 3.1.5 Pomocné vybavení

K pomocným strojním zařízením drátotažných strojů patří:

- Hrotovací zařízení: slouží k hrotování konců drátu nebo tyčí. Po zahrotování by měl drát bez problému v dostatečné délce projít průvlakem, aby jej mohly zachytit zatahovací kleště.
- Průvlakové skříňky: zabraňují pohybu průvlaku ve směru tažení, umožňují chlazení průvlaku vodou a také slouží jako zásobník pro mazivo.
- Zatahovací kleště: slouží k zachycení a zatažení zeslabeného konce drátu na tažný buben.
- Rovnačka: slouží k vyrovnaní kruhového drátu a pro přípravu k tažení.
- Ruční jeřábky: slouží ke snímání drátu.
- Svařovací stroje: používají se ke svařování drátu před tažením a při přetržení drátu během tažení (ale také při patentování nebo pozinkování na spojitých linkách) [6].

### 3.2 Analýza napjatosti v průvlaku

Složitý průběh deformace v celém rozsahu tvářeného materiálu v deformačním pásmu souvisí s rozložením napětí v jednotlivých bodech tohoto objemu. U tažené tyče s kruhovým průřezem můžeme vycházet ze stejného rozdělení podélných složek napětí  $\sigma_l$  v různých příčných řezech pásma deformace. Na **obr. 12** je zobrazeno napětí různých velikostí a jejich profil se modifikuje v průběhu od začátku vstupu do pásma deformace, až po jeho výstup.

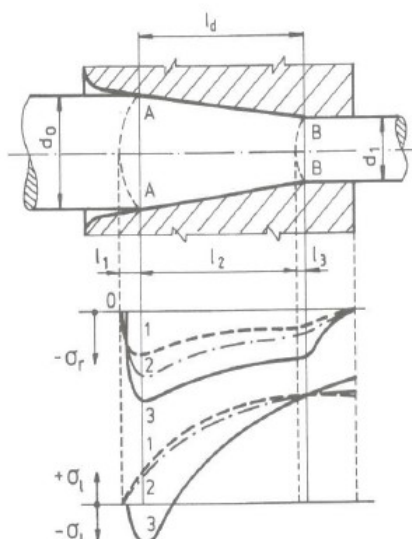


**Obr. 12** Modifikující se podélná napětí  $\sigma_l$  v příčných řezech délky pásma deformace  $l_d$  [1]

V počátečním pásmu elastických deformací lze předpokládat působení napětí  $\sigma_l$  s homogenním stavem napjatosti. V tomto pásmu vzniká pružná deformace. V pásmu plastické deformace mají vliv tlaková napětí  $-\sigma_l$  na povrchové vrstvy materiálu. Tlaková napětí jsou způsobena brzdícím účinkem vnějšího tření a může díky nim dojít i k napěchování materiálu. Naopak vrstvy materiálu, které se nacházejí uprostřed, jsou již vystaveny tahovým složkám  $+\sigma_l$ . V jakémkoliv příčném řezu uprostřed deformačního pásma působí podélná tahová napětí  $+\sigma_l$ . Tahová napětí dosahují největších hodnot v osovém paprsku. Na výstupu z pásma deformace působí již pouze podélná tahová napětí  $+\sigma_l$ , ale tato napětí dosahují maximálních hodnot naopak na povrchových vrstvách.

Tlakové složky radiálního a obvodového napětí v příčných řezech se musí rovnat  $\sigma_r = \sigma_\theta$ . Po délce deformačního pásma zůstává jejich průběh ve všech úrovních identický.

Na **obr. 13** je znázorněn průběh radiálních a podélných napětí v zóně deformace. Zóna deformace je rozdělena na tři úseky  $l_1$ ,  $l_2$  a  $l_3$ . Dále si můžeme všimnout zakreslených tří křivek podélného napětí  $+\sigma_l$ ,  $-\sigma_l$  a tří křivek radiálního napětí  $\sigma_r$ . Křivka 1 znázorňuje napětí v ose drátu, křivka 2 znázorňuje napětí vlákna mezi osou drátu a povrchem drátu. Křivka 3 znázorňuje napětí v povrchové vrstvě drátu. Na povrchu materiálu, kde je materiál v kontaktu s průvlakem je radiální napětí největší a směrem k ose se radiální napětí zmenšuje. V důsledku elastické deformace v úseku  $l_1$  vznikají radiální tlaková napětí dříve v osových vrstvách, protože z průběhu radiálních pružných deformací se napětí přenáší mezi jednotlivými vrstvami kovu z povrchu do středu. Podélná napětí  $\sigma_l$  mají v jednotlivých vrstvách opačný průběh. Průběh podélných napětí, která mají ve středových oblastech nejvyšší hodnoty, může být příčinou výskytu trhlin ve středových vláknech materiálu při tažení. Při tažení je rychlost prodlužování středových vláken větší, než u vláken povrchových [14].



**Obr. 13** Pásmo deformace – průběh radiálních a podélných napětí [1]

### 3.3 Důsledky napjatosti v deformačním pásmu z technologického hlediska

Pro technologický postup tažení je důležitá podmínka plasticity, kterou můžeme zjednodušeně matematicky vyjádřit na základě hypotézy největších smykových napětí:

$$R_e = \sigma_1 - \sigma_r \quad (6)$$

Podmínka plasticity platí ve všech bodech pásma deformace. Na **obr. 12** uvedeném výše tedy platí, že pro veškeré body kruhového průřezu plochy mezi průřezy A-A a B-B je okamžitá mez kluzu  $R_e$  tvářeného materiálu, která představuje okamžitý přirozený deformační odpor  $\sigma_{pd}$  daného tvářeného materiálu. S ohledem na znaménka musíme do rovnice dosazovat napětí  $\sigma_l$  a  $\sigma_r$ .

Podmínka plasticity pak má následující tvar:

$$R_e = \pm \sigma_1 + \sigma_r \quad (7)$$

Napětí  $\sigma_r$  platí jak pro vrstvu povrchovou, tak pro vrstvu osovou, a to po celé délce deformačního pásma. Napětí  $\sigma_l$  platí ze začátku pouze pro povrchové deformace ve tvaru  $-\sigma_l$  a

až v následující části tohoto pásma ve tvaru  $+\sigma_l$ . Důsledkem tohoto je, že podmínka plastičnosti ovlivňuje průběh podélných napětí.

Součet napětí  $\sigma_l$  a  $\sigma_r$  dle rovnice (6) a (7) je konstantní a je roven okamžité mezi kluzu  $Re$  (tedy přirozenému deformačnímu odporu). Podmínka plastičnosti je dána pro celistvý stav stabilní deformace. A tedy platí že,  $\sigma_{pd}=Re$  až  $\sigma_{pd}=Rm$ .  $Rm$  se rovná skutečné pevnosti. Přirozený deformační odpor materiálu ve skutečném procesu tažení roste se stupněm deformace podle mocninné křivky. Toto je dáno vztahem:

$$S\sigma = k \cdot S_{\varepsilon n} \quad (8)$$

kde:

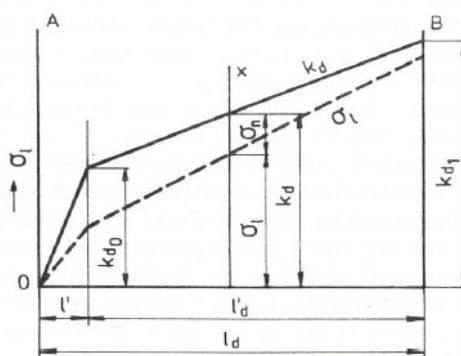
$S_{\sigma}$  – intenzita napětí (přirozený deformační odpor),

$S_{\varepsilon}$  – intenzita deformace,

$k$  – materiálová konstanta,

$n$  – koeficient zpevnění  $<1$ .

Pokud nastává ideální stav, kdy přirozený deformační odpor materiálu narůstá lineárně se stupněm deformace, nastane stav největšího zpevnění materiálu, tedy  $n = 1$ . Tuto změnu deformovaného materiálu znázorňuje **obr. 14**, kde ji reprezentuje čára  $k_d = \sigma_{pd}$ .



**Obr. 14** Změna přirozeného deformačního odporu v deformačním pásmu deformace [9]

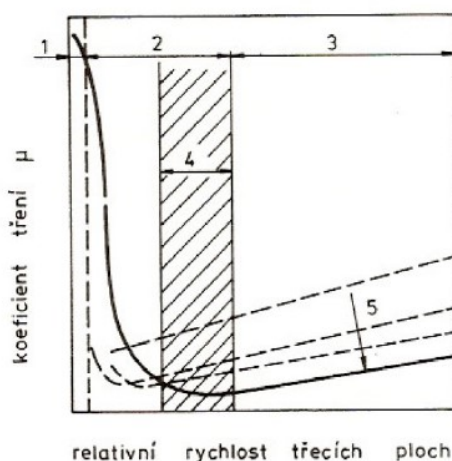
Na obrázku si můžeme také všimnout ideálního průběhu napětí  $+\sigma_l$ . Rozdíl čar  $k_d$  a  $\sigma_l$  udává v jakémkoliv příčném průřezu žádoucí radiální napětí nezbytné ke splnění podmínky plasticity s ustáleným růstem deformace. V praxi může nastat situace, kdy hodnota napětí  $+\sigma_l$  bude tak vysoká, že se vyrovná deformačnímu odporu  $\sigma_{pd}$  na mezi pevnosti  $Rm$ .

K porušení soudržnosti tyče může dojít jenom v osových vrstvách, protože  $-\sigma_r$  je tlakové napětí, a to pouze za předpokladu, že tahové napětí stavu  $+\sigma_l \geq R_m$  a nastane tak vytvoření podmínek nestabilní deformace. Šíření trhliny od osy směrem ke vnějším vrstvám se formuje při vzniku krčku u tahové zkoušky. U tažené tyče může dojít k přetažení materiálu, to znamená, že tlakové radiální napětí zarazí šíření trhliny v osových vrstvách [6, 9].

### 3.4 Vliv parametrů při tažení

#### 3.4.1 Vliv mazání

Během tažení vzniká mezi povrchem drátu a tažným otvorem průvlaku tření, které je různě velké v závislosti na stavu povrchů, maziva a podmínek tažení. Během procesu tažení je nutno ztráty způsobené vnějším třením minimalizovat – snížit koeficient kluzného tření. Při kluzném tření dvou pevných kovů vznikají podle Stribecka **obr. 15** čtyři druhy tření [1, 15].



**Obr. 15** Závislost mezi koeficientem tření, relativní rychlostí a plošným tlakem při kluzném tření podle R. Stribecka: 1-suché tření, 2-hraniční tření, 3-hydrodynamické tření, 4-smíšené tření, 5-růst plošného tření [1]

**1) Suché tření** je charakterizováno vysokou hodnotou koeficientu tření.

**2) Hraniční tření** je charakterizováno tenkou molekulovou vrstvou mazacího filmu mezi dvěma kluznými plochami. Při zvyšující se relativní rychlosti třecích ploch se výrazně snižuje koeficient tření. Hraniční tření vzniká při relativní malé kluzné rychlosti při velkém zatížení.

**3) Hydrodynamické tření** je charakterizováno vysokou relativní kluznou rychlostí, při které nelze přesně stanovit závislost mezi koeficientem tření a relativní kluznou rychlostí. U hydrodynamického tření roste koeficient tření v závislosti na relativní kluzné rychlosti velice

pomalu. Velikost koeficientu tření je výrazně závislá na středním tlakovém napětí mazacího filmu. Čím vyšší je plošný tlak, tím nižší je hodnota koeficientu tření.

**4) Smíšené tření** je charakterizováno jako přechodná oblast mezi hraničním třením a hydrodynamickým třením. Tlak, který přenáší mazací film hydrodynamického tření je v důsledku vrcholů drsnosti povrchu třecích ploch přerušován. Smíšené tření vzniká při nízkých relativních kluzných rychlostech a vysokých zatížených při tenkých tekutých mazacích filmech.

Tření při tažení se liší od výše popisovaného kluzného tření. Při tažení drátu se kov zpevňuje, specifické plošné tlaky jsou velice vysoké, povrchové plochy se plasticky přetvářejí. Můžeme říci, že při klasickém tažení dochází ke smíšenému tření. Podle Rangeva a Wistracha bylo při experimentu prokázáno, že závislost koeficientu tření na tažné rychlosti vykazuje nejdříve znaky hraničního tření a při vysokých rychlostech tažení také přechod k podmínkám hydrodynamického tření.

Při tažení drátu je nutno z hlediska mazání, opotřebení a tření rozlišovat mazání za sucha a mazání za mokra [16].

#### **Mazání za sucha**

Pokud pracujeme s čerstvým mazivem s nízkou vlhkostí, je do otvoru prův laku dopravováno drátem dostatečné množství maziva. Pokud pracujeme s opotřebovaným mazivem, které je spíše suché, pak není dopravováno drátem do otvoru prův laku dostatečné množství maziva. Při dopravě maziva do otvoru prův laku hraje velkou roli rychlost pohybu drátu v mazací skřínce. Čím větší rychlost, tím se tloušťka mazacího filmu zmenšuje [1, 77].

#### **Mazání za mokra**

Z hlediska životnosti a provozu technických zařízení a prův laků je mazání za mokra nejvýhodnějším stavem. Při hydrodynamickém mazání se mezi dvěma pohybujícími povrchy vytvoří tlak samočinně. Vtažení dostatečného množství mazadla do pracovní části mezi prův lak a drát je základním požadavkem, aby tvářecí proces probíhal lépe, s menším třením na stykových plochách drátu a prův laku. K vtažení dostatečného množství mazadla do pracovní části prův laku, přispívá kvalitní povrchová úprava drátu. Mazadla nesmí hrudkovatět (vytvářet hrudky). Při optimálním přívodu mazadla do prův laku dochází k vytvoření téměř souvislé vrstvy mazadla na taženém drátě. Také na hotovém drátě zůstává tato vrstva, kterou nazýváme

zbytkový film. Zbytkový film vytváří dočasnou ochranu drátu vůči korozi. Někdy je však tato vrstva nežádoucí a je třeba ji odstranit. Pokud si např. zákazník tuto zbytkovou vrstvu vzhledem k jeho technologii nepřeje [1, 15].

### **3.4.2 Vliv rychlosti tažení**

Čím vyšší rychlost tažení, tím se snižuje doba ochlazování drátu. Aby nedocházelo při tažení za vyšších rychlostí ke zvyšování teplot a tím ke zhoršení jakosti drátu, tak se musíme zaměřit na účinné ochlazování drátu. U ocelových drátů o středním a vysokém obsahu uhlíku, nedochází k ovlivňování mechanických a technologických vlastností vlivem tažné rychlosti, při účinném ochlazování drátu [18, 19].

### **3.4.3 Vliv povrchu – povrchové úpravy**

U ocelí existuje několik typů povrchových úprav. Jako první je moření, pak následuje vodní oplach, a nakonec nosič maziva (vápno, borax, mýdla, fosfatizační proces). Při následném spojení vrstvy maziva s nosičem maziva během procesu tažení vzniká tzv. soustava, která ovlivňuje průběh tažení (kvalitu tažení, průběh plastické deformace, snižuje opotřebení průvlek). Fosfátové vrstvy mají snahu zamezit přímému styku tvářeného materiálu s nástrojem a zároveň vytvořit kvalitní nosnou vrstvu pro mazivo [20].

### **3.4.4 Vliv geometrie pracovní části – delta faktor**

Důležitým faktorem při tažení je geometrie pracovní části průvleku, kterou znázorňujeme pomocí delta faktoru  $\Delta$ . Delta faktor  $\Delta$  vyjadřuje poměr mezi středním průměrem drátu  $d$  a délkou kontaktu mezi drátem a průvlekem  $l$ . Delta faktor vyznačuje tvar deformační zóny.

$$\Delta = d / l \quad (9)$$

Velké úhly, malé deformace = vyšší hodnoty  $\Delta$ , což zvyšuje podíl ztrátové deformace a povrchového zpevnění vlivem velké smykové deformace. Velké hodnoty  $\Delta$  často vedou ke vzniku vnitřních trhlin.

Malé úhly, velké deformace = malé hodnoty  $\Delta$  zvyšují vliv tření a ohřevu na rozhraní drátu a průvleku. Doporučuje velikost delta faktoru je 1,5 [18, 21].

## 4 Únavové vlastnosti ocelí

Staré české přísloví zní: „Tak dlouho se chodí se džbánem pro vodu, až se ucho utrhne“. Neboli neustálým cyklickým zatěžováním se v materiálu kumuluje napětí, které vede ke vzniku mikrotrhlínky a k následnému porušení materiálu. Vzniklá mikroskopická trhlínka se cyklickým zatěžováním, která nemusí být vyšší než mez kluzu zvětšuje, až dochází k úplnému porušení materiálu. Proces kumulace napětí a s tím spojená degradace materiálu se nazývá únava [22, 23].

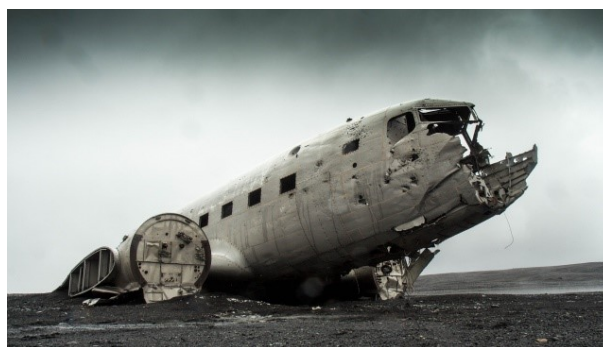
### 4.1 Historie

Informace a výzkum únavových vlastností materiálu jdou neustále kupředu. Bohužel nejvíce nových informací se nám dostává právě při haváriích. Právě havárie posouvají výzkum únavových vlastností dál a dál. Jednou z klíčových havárií, kde se zkoumala únava materiálu, bylo osm havárií letounu De Havilland Comet v rozmezí let 1952 – 1954. Jedna z havárií je zobrazena na **obr 16**. Po několika letech výzkumu se přišlo na to, že za haváriemi stojí hranatá okénka letounu. V rozích okének docházelo ke koncentraci napětí, kde se při vysokých rychlostech vytvářely trhliny, díky kterým docházelo k haváriím. Od té doby jsou okénka všech letounů kulatá. Nicméně rok 1952, kdy se začalo zabývat problematikou havárií letadel De Havilland Comet to nebyly první zmínky ohledně únavy materiálu a jejich vlastností [24].

První zmínka ohledně únavy materiálu se datuje k roku 1828, kdy německý vědec W. A. J. Albert zkoumal cyklické zatížení řetězů v těžebních dolech.

Druhá zmínka se datuje k roku 1839, kdy francouzský inženýr J. V. Poncelet poprvé používá termín „únava“ ve své knize o mechanice. V této knize vysvětluje základ cyklického zatěžování materiálu.

Třetí zmínka je z roku 1850 a je historicky nejvýznamnější. Francouzský inženýr Augustin Wöhler jako první prováděl systematické experimenty ohybem za rotace a zkoumal zatížení os železničních vagonů. Podle něj byla pojmenována křivka závislosti amplitudy napětí na počtu cyklů do únavového lomu – tzv. Wöhlerova křivka. Této křivce se věnuje v následující **kapitole č. 4.5.1** [22, 23].

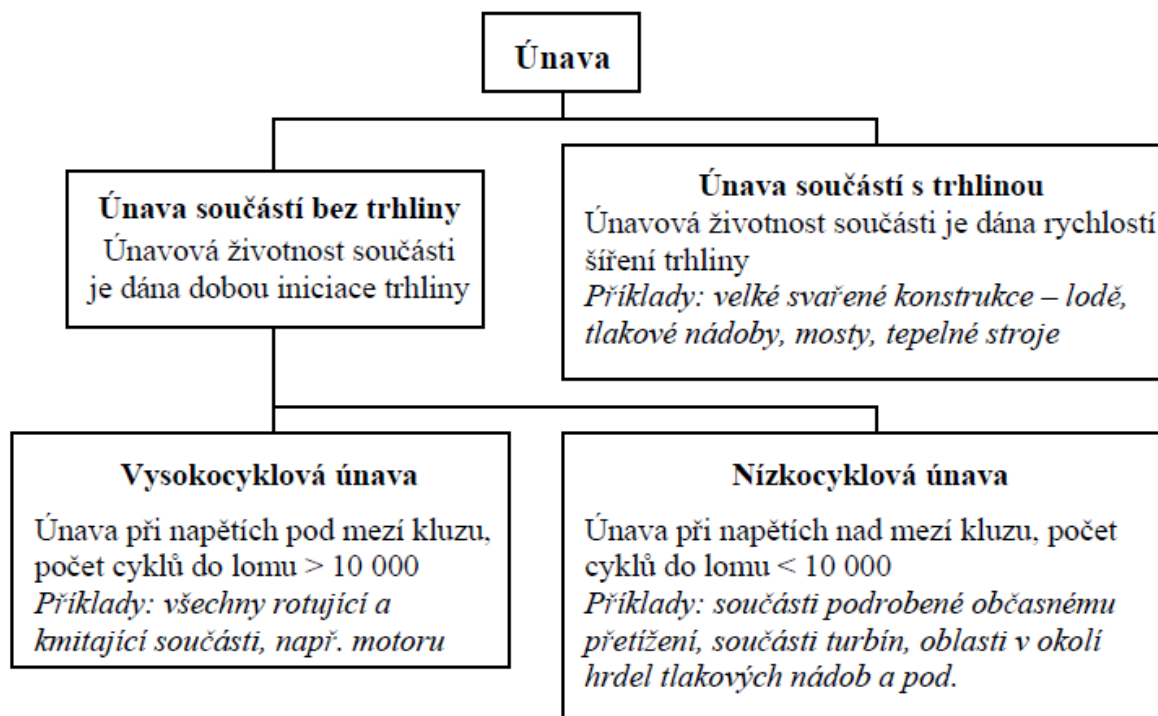


**Obr. 16** Havárie letounu De Havilland Comet s hranatými okénky [24]



## 4.2 Oblasti únavového zatěžování

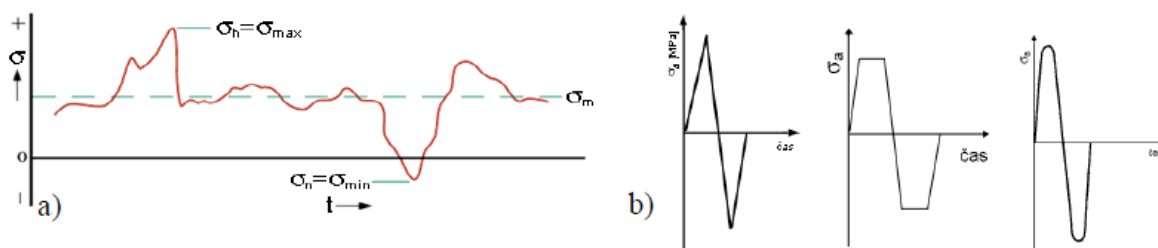
Únava vyjadřuje počet cyklů při daném zatížení, které materiál snese, než dojde k jeho porušení. **Obr. 17** znázorňuje rozdělení typů únavy materiálu [22, 23].



**Obr. 17** Rozdělení typů únavy [25]

## 4.3 Zátěžný cyklus

S průmyslovým rozvojem a nárůstem cyklicky namáhaných součástí se čím dál více kladl důraz na výzkum únavových procesů. Snahou bylo laboratorně a co nejlépe napodobit zatěžování materiálu tak, jak probíhá ve skutečnosti a tím stanovit určité mechanické charakteristiky. Z výsledných mechanických charakteristik následně vyvodit výsledek pro určení životnosti konstrukce. Zátěžný cyklus vyjadřuje průběh napětí v čase. Během zatěžování je důležité se zaměřit na amplitudu napětí  $\sigma_a$ , střední napětí  $\sigma_m$ , rychlost cyklování a plastickou  $\varepsilon_{ap}$  a elastickou deformaci  $\varepsilon_{ae}$ . Využívají se různé průběhy zatěžování. Nejčastěji používaný je sinusový průběh s konstantní frekvencí zatěžování, který můžeme vidět úplně vpravo na **obr. 18**. Dále existují také cykly jako je trojúhelníkový, lichoběžníkový anebo obecný zátěžný cyklus [22, 23].



**Obr. 18** Zátěžové cykly zleva: obecný, trojúhelníkový, lichoběžníkový a sinusový [26]

Maximální rozkmit měnící se v čase od střední hodnoty  $\sigma_m$  se nazývá amplituda napětí  $\sigma_a$ . Je-li střední hodnota napětí nulová, jedná se o symetrický cyklus a je-li nenulová, tak se jedná o cyklus asymetrický. Dále máme vyznačenou maximální horní hodnotu  $\sigma_h$  a minimální dolní hodnotu napětí  $\sigma_n$ . Z těchto parametrů můžeme určit napět'ový poměr  $R$  a amplitudový poměr asymetrie cyklu  $P$ :

$$R = \sigma_n / \sigma_h \quad (10)$$

$$P = \sigma_h / \sigma_a \quad (11)$$

kde:

$\sigma_n$  – minimální dolní hodnota napětí,

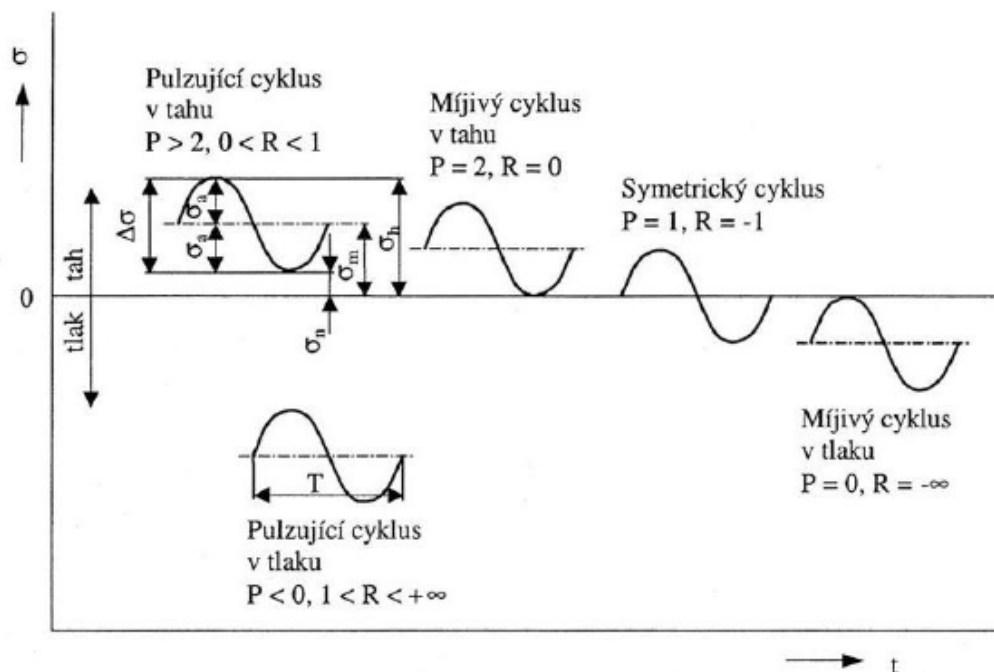
$\sigma_h$  – maximální horní hodnota napětí,

$\sigma_a$  – amplituda napětí,

$R$  – napět'ový poměr,

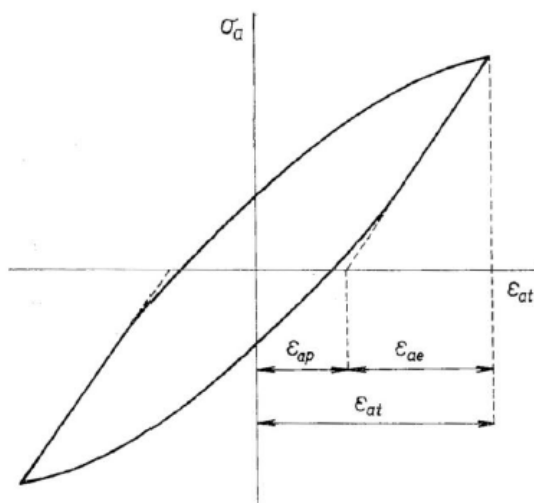
$P$  – amplitudový poměr [22, 23].

Kombinací parametrů  $P$  a  $R$  dostáváme typy cyklů, jako jsou pulzující, m'jivý v tlaku nebo v tahu či symetrický. Porovnání jednotlivých typů zátěžných cyklů je uvedeno na **obr. 19**.



**Obr. 19** Porovnání jednotlivých typů zátěžných cyklů [27]

Závislostí amplitudy napětí na celkové deformaci dostáváme hysterezní smyčku, kterou si můžeme prohlédnout na **obr. 20**. Z hysterezní smyčky následně určíme elastickou a plastickou část deformace [22, 23].



**Obr. 20** Hysterezní smyčka [22]

U mechanického zkoušení vzorků rozlišujeme tři typy zatěžování. Konstantní amplituda napětí, celková deformace a plastická deformace, z nichž je vždy jedna hodnota udržována konstantní. Při zatěžování konstantní amplitudou napětí  $\sigma_a$  vzniká tzv. měkký cyklus, kdy si deformaci řídí materiál sám. Zatěžováním konstantní amplitudou celkové deformace  $\epsilon_{at}$  vzniká

tzv. tvrdý cyklus – reakcí materiálu je napětí. Zatěžování konstantní amplitudou plastické deformace  $\mathcal{E}ap$  se často nepoužívá, protože je třeba mít přístup k moderním zařízením. Cyklus je podobný cyklu tvrdému [22, 23].

#### 4.4 Etapy únavového života

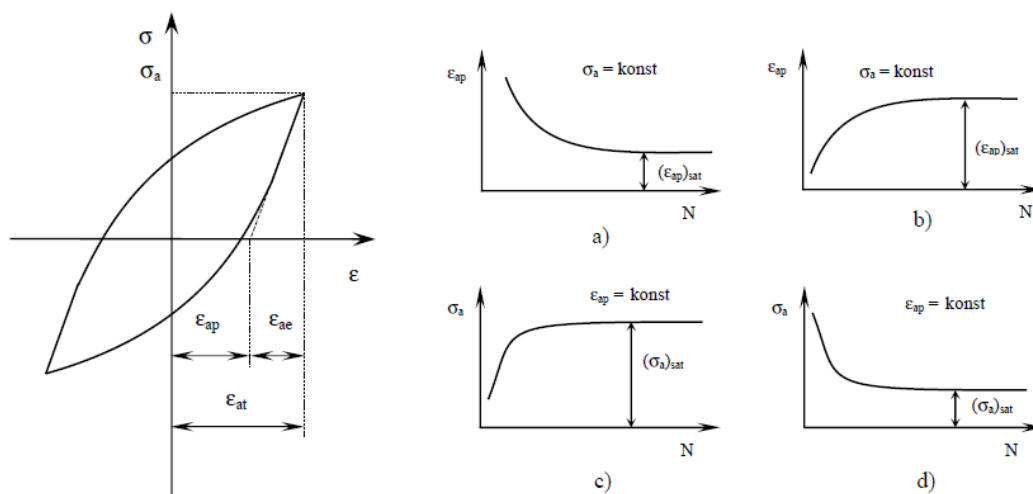
Únavový život můžeme rozdělit do 3 etap:

- 1) Stádium mechanických změn.
- 2) Stádium nukleace únavových trhlin.
- 3) Stádium šíření trhlin.

##### 4.4.1 Stádium mechanických změn

Cyklickým zatěžováním dochází ke změnám v mikrostruktuře materiálu, kterým se mění mechanické, elektrické a fyzikální vlastnosti. Největší změny těchto vlastností pozorujeme na začátku cyklického zatěžování a s rostoucím počtem cyklů, se téměř nemění. Největší změny jsou změny mechanických vlastností, které vyjadřuje odpor materiálu proti deformaci způsobené vnějšími silami. V průběhu cyklické deformace může odpor materiálu vzrůstat (materiál se cyklicky zpevňuje) nebo klesat (materiál se cyklicky změkčuje). Tyto změny zpevňování nebo změkčování jsou výrazné pouze na začátku, tak jako tomu bylo u změn mechanických, elektrických a fyzikálních vlastností. Po určité cyklické deformaci intenzita zpevňování nebo změkčování ustává. Kritérium pro určení, zda se materiál bude cyklicky zpevňovat či změkčovat, je poměr  $Rm/Rp0,2$ . Je-li poměr větší než 1,4, tak se materiál ve většině případů zpevňuje. Při poměru menším než 1,2 bude nastávat změkčení. Případ cyklického zpevnění nastává, pokud amplituda deformace s počtem cyklů klesá (**obr. 21a**). Případ cyklického změkčení se naopak projevuje růstem amplitudy deformace (**obr. 21b**).

Při zatěžování s konstantní amplitudou deformace se mění amplituda napětí. Růstem amplitudy napětí se projevuje cyklické zpevnění (**obr. 21c**). Poklesem amplitudy napětí se naopak projevuje změkčení (**obr. 21d**) [22, 28].



**Obr. 21** *Hysterezní smyčka vlevo a cyklické zpevnění a změkčení pro různé režimy zatěžování a-d vpravo [28]*

#### 4.4.2 Stádium nukleace únavových trhlin

Únavové trhliny vznikají ve většině případů na povrchu. K tvorbě trhlin dochází v místech vysokého lokálního napětí nazývaných koncentrátory napětí. Povrchové koncentrátory napětí mohou vznikat na základě:

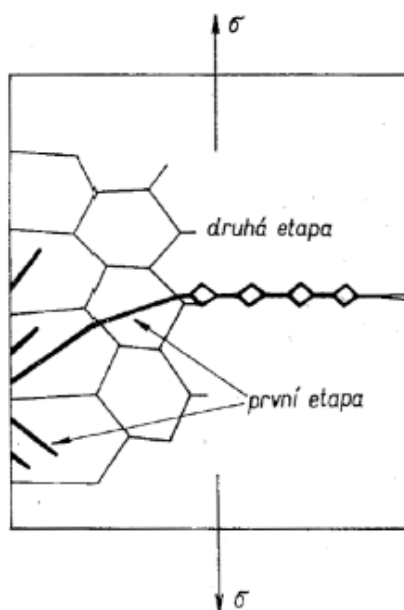
- povrchových nerovností, protože nelze vyrobit dokonale rovný povrch. Jedná se o (mikro)vruby, svary, změny průřezu a jiné nerovnosti. Všechny tyto příčiny nerovnosti mohou působit jako koncentrátory napětí. Do hry vstupují i další faktory:
- namáháním při ohybu a krutu je napětí maximální na povrchu,
- dislokace vystupují na povrch a způsobují relié,
- povrchová koroze (obzvlášť lokalizovaná jako např. pitting).

Mezi nejčastější místa nukleace únavových trhlin na povrchu materiálu jsou únavová skluzová pásma, hranice zrn, dutiny a kavity, rozhraní sekundární fáze – matrice. Únavová trhlina se může vytvořit také uvnitř materiálu důsledkem vnitřních defektů nebo v případě zpevněného povrchu, kdy je mez kluzu materiálu na povrchu výrazně vyšší než jinde [22, 27].

#### 4.4.3 Stádium šíření trhlin

Vytvořením mikrotrhliny končí stádium nukleace. Při jednoosém zatěžování je největší smykové napětí v rovinách, které svírají se směrem zatěžování  $45^\circ$ . Vytvořené mikrotrhliny tak leží v nejbližších skluzových rovinách s podobným sklonem. Cyklickým zatěžováním dochází

k růstu trhlin více do hloubky materiálu. Dosažením určité délky, která je závislá na amplitudě zatěžování, počtu cyklů a na vlastnostech materiálu se trhliny dále stáčí do roviny, která je kolmá ke směru namáhání. Materiálem se dále šíří většinou pouze jedna trhlina nazývána magistrální. Tento proces se značí jako přechod trhlin z šíření krystalografického (první etapa) do nekystalografického (druhá etapa). Stádia šíření trhlin je znázorněno na **obr. 22**. Šíření magistrální trhliny je ukončeno únavovým lomem zbývajících částí zatěžovaného průřezu [22, 27].



**Obr. 22** Etapové šíření únavové trhliny [22]

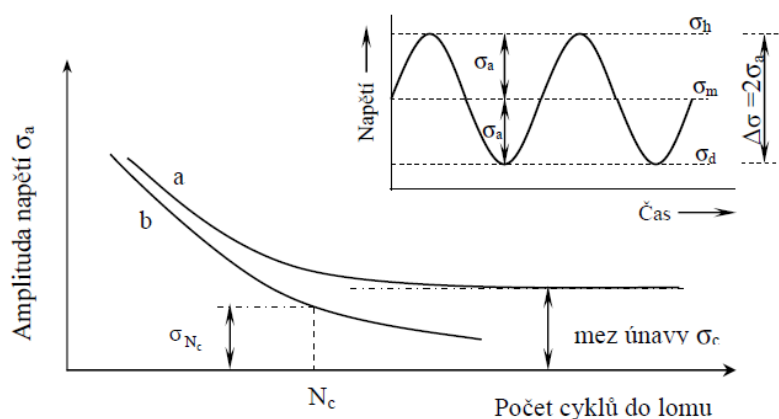
## 4.5 Křivky únavového života

Křivky únavového života se používají pro určení přibližného počtu cyklů do porušení součásti. Pro oblast nízkocyklové a vysokocyklové únavy se používá Wöhlerova křivka. V oblasti nízkocyklové únavy se kromě Wöhlerovy křivky používá i Manson-Coffinova křivka, protože přidává do závislosti plastickou deformaci na počtu cyklů do lomu.

### 4.5.1 Wöhlerova křivka (S-N křivka)

S narůstajícím počtem cyklů roste poškození materiálu. Únavové zatížení materiálu má kumulativní charakter. Pro každou amplitudu zatížení (stejná teplota, frekvence, rozměry tělesa) existuje určitý počet cyklů  $N_f$  do porušení materiálu. Závislost amplitudy napětí  $\sigma_a$  na počtu cyklů do lomu znázorňuje Wöhlerova křivka neboli křivka únavového života (S-N

křivka). Z **obr. 23** je vidět, že Wöhlerova křivka se může vyskytovat ve dvou různých variantách, od kterých se odvíjí určení počtu cyklů do lomu. Křivka typu „a“ se s přibývajícím počtem cyklů blíží k mezní hodnotě  $\sigma_c$  (mez únavy), kde nedochází k lomu ani po velmi vysokém počtu cyklů. U křivky typu „b“ se amplituda napětí plynule snižuje s počtem cyklů. K porušení materiálu dochází při konečném počtu cyklů pro všechny hodnoty amplitud napětí [22].



**Obr. 23** Wöhlerova křivka (schematicky).  $\sigma_h$  – horní napětí,  $\sigma_a$  – amplituda napětí,  $\sigma_d$  – dolní napětí,  $\sigma_m$  – střední napětí [28]

Křivka  $\sigma_a - N_f$  může být konstruována pro různá střední napětí  $\sigma_m$ , která ovlivňují její polohu. Obvykle se experimentálně zjišťují křivky  $\sigma_a - N_f$  při symetrickém zátěžném cyklu ( $\sigma_m = 0$ ) a při míjivém cyklu ( $\sigma_m = \sigma_a$ ), které si můžeme prohlédnout na **obr. 22**. Oba diagramy se shodují ve společném poklesu počtu cyklů do lomu s rostoucím napětím. Tato oblast se nazývá časovaná únavová pevnost a je ohraničena zprava počtem cyklů  $N_c$  (počet cyklů, nad kterým již nedojde k únavovému porušení). Oblast trvalé únavové pevnosti se nazývá jako oblast s vyšším počtem cyklů [22]. Díky závislosti  $\sigma_a - N_f$  můžeme odvodit následující zákonitosti únavového procesu:

- s klesající amplitudou napětí roste počet cyklů do porušení materiálu,
- hranice pod kterou nedochází k porušení ani při téměř neomezeném množství cyklů, se nazývá mezní amplituda napětí,
- absolutní velikost maximálního napětí  $\sigma_h$  a velikost amplitudy napětí  $\sigma_a$  ovlivňuje počet cyklů do porušení. Čím je větší amplituda napětí  $\sigma_a$  při dané velikosti maximálního napětí  $\sigma_h$ , tím menší počet cyklů materiál snese do jeho porušení [22]. Křivku životnosti  $\sigma_a - N_f$  popisuje mocninná závislost navržená Basquinem:

$$\sigma'_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (12)$$

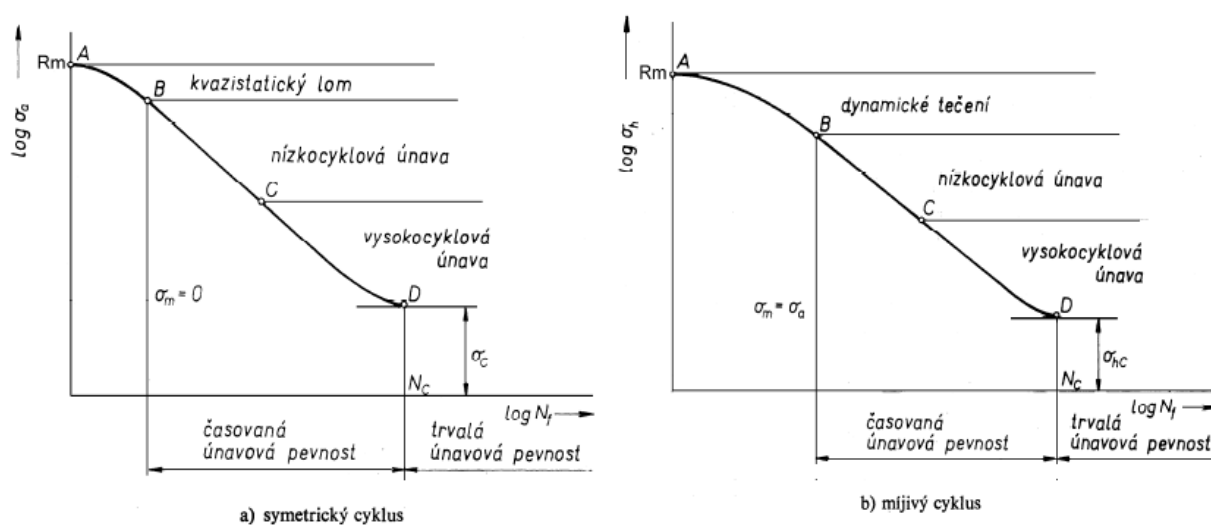
kde:

$\sigma'_f$  – součinitel únavové pevnosti,

$b$  – součinitel únavové životnosti [22].

Obě konstanty vyjadřují odpor materiálu proti únavovému poškození při silovém zatěžování [28]. Křivka životnosti  $\sigma a - N_f$ , která je zobrazena na **obr. 24**, se dělí na následující čtyři oblasti:

- oblast kvazistatického lomu,
- oblast cyklického tečení,
- oblast nízkocyklové únavy,
- oblast vysokocyklové únavy [22].



**Obr. 24** Křivky životnosti [29]

#### Oblast kvazistatického lomu A – B (symetrický cyklus)

Amplituda v bodě A vykazuje hodnotu meze pevnosti  $R_m$ , kde po několika málo cyklech dochází k lomu. Vzniklý lom vykazuje znaky tvárného lomu (proto bývá označován jako kvazistatický lom) a nemá charakter únavového porušení. Bod A na křivce  $\sigma a - N_f$  vykazuje mezní stav, kdy po prvním cyklu došlo k překročení plastické deformace odpovídající plastické deformaci v okamžiku plastické nestability [22, 26].



### **Oblast dynamického tečení A – B (míjivý cyklus)**

Dynamické tečení materiálu vykazuje růst celkové deformace. Vysokoteplotní tečení materiálu vykazuje také creep. Křivka dynamického tečení materiálu se však od creepu odlišuje tím, že její první a třetí stádium je zcela nevýrazné. Po přechodu křivky do pásma nízkocyklové únavy deformace tečením pokračuje. S narůstajícím počtem cyklů rychlost tečení klesá k nule. Jednosměrná deformace způsobená tečením bude vždy menší než hodnota, při které vznikne plastická nestabilita a lom krčku. Příčinou porušení materiálu je střídavá plastická deformace, která vede k únavovému lomu vytvářením a šířením únavových trhlin [22]. Oblast dynamického tečení je charakteristická pro míjivý cyklus (asymetrické zatěžování s kladnou hodnotou středního napětí). Dynamické tečení probíhá pouze při zatížení tělesa amplitudou konstantního napětí, kdy se objevuje relaxace střední hodnoty napětí [22].

### **Oblast nízkocyklové a vysokocyklové únavy B – D (symetrický a míjivý cyklus)**

Následující dvě oblasti časované únavové pevnosti se v diagramu  $\sigma_a - N_f$  zpravidla dělí na oblasti nízkocyklové a vysokocyklové únavy. V bodě C dochází k nespojitosti křivky, která vykazuje změnu rychlosti kumulativního poškození při přechodu z mikroplastického do makroplastického stavu. Za hranici přechodu se považuje mez kluzu. Musíme však zdůraznit fakt, že žádný zákonitý vztah mezi mezí kluzu a mezi únavy neexistuje. Proto nelze nespojitost v bodě C tímto způsobem vysvětlit. Předpokládáme-li existenci této nespojitosti, můžeme hledat vysvětlení v různé rychlosti kumulativního poškození v nukleačním stádiu únavových trhlin, tedy v různém počtu cyklů vedoucích k lomu [22]. Lom vznikající v oblasti nízkocyklové únavy je téměř stejný jako lom získaný při vysokocyklové únavě. Rozdíl je v tom, že konečné porušení je ve středu průřezu vzorku. Pro únavové lomy získané při vysokocyklové únavě je charakteristická jedna magistralní trhlina a excentrické umístění konečného lomu [10].

#### **4.5.2 Manson – Coffinova křivka $\epsilon_a - N_f$**

Mansonova - Coffinova studie umožnila popis počtu cyklů do lomu v závislosti na amplitudě plastické deformace. Byl vytvořen základ pro výpočet životnosti při nízkém počtu cyklů do lomu. Mansonův-Coffinův vztah pro závislost mezi amplitudou plastické deformace  $\epsilon_{ap}$  a počtem cyklů do lomu má tvar:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (13)$$

kde:

$\varepsilon'_f$  – součinitel únavové tažnosti,

$c$  – exponent únavové životnosti [22].

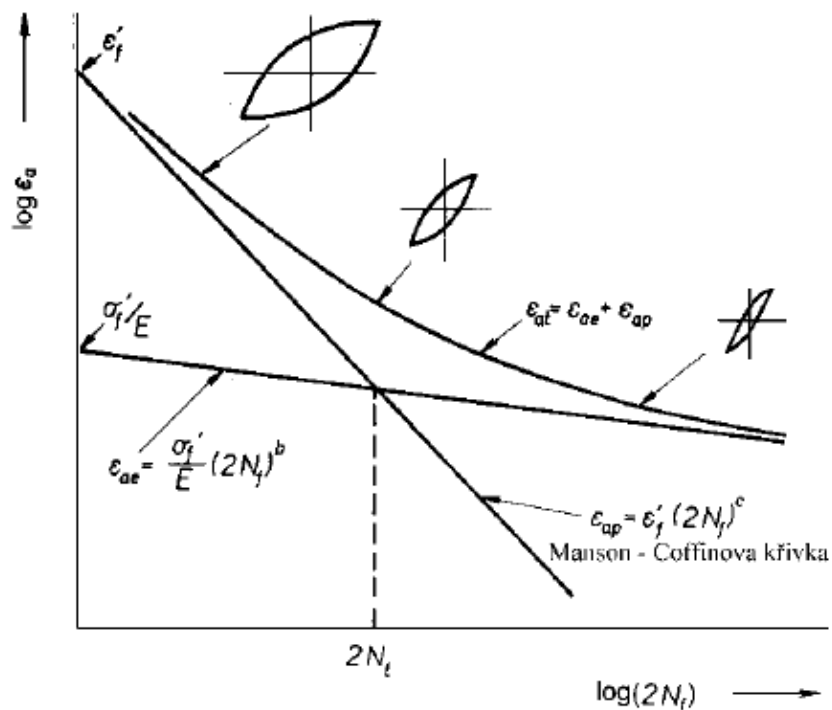
Z experimentálních důvodů je často výhodnější využívat při únavovém zatěžování amplitudu celkové deformace, která se skládá jak z plastické, tak z pružné složky.

$$\varepsilon_{at} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (14)$$

kde:

$E$  – modul pružnosti.

Při nízkých počtech cyklů do lomu převládá plastická složka  $\varepsilon_{ap}$ , která zdůrazňuje význam součinitele únavové tažnosti  $\varepsilon'_f$ . Při vysokých počtech cyklů do lomu se vykazuje elastická složka  $\varepsilon_{ae}$ , která zdůrazňuje význam součinitele únavové pevnosti  $\sigma_f$ . Stejný rozsah plastické a elastické složky odpovídá tranzitnímu počtu cyklů  $N_t$  zobrazené na **obr. 25** [22].

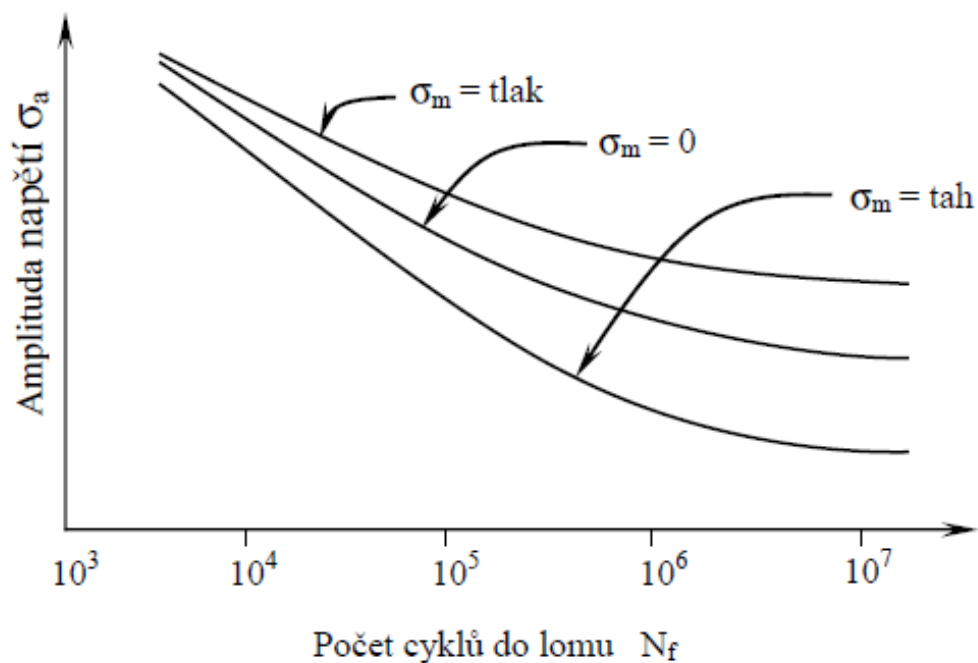


**Obr. 25** Schématický průběh křivek životnosti [30]

## 4.6 Faktory ovlivňující mez únavy

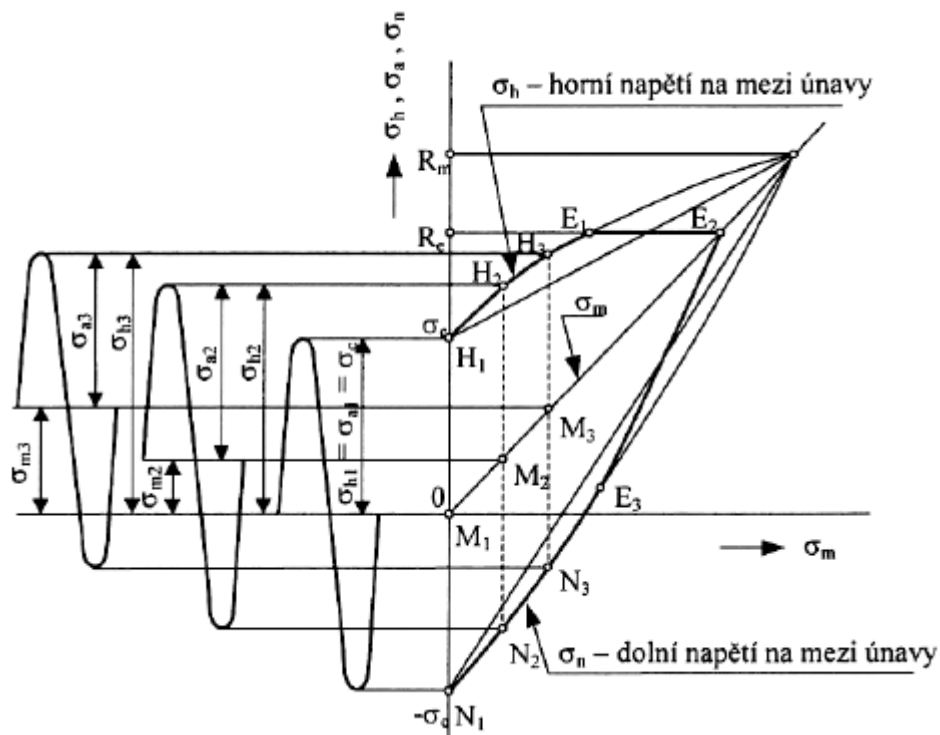
### 4.6.1 Vliv středního napětí

Střední napětí při únavovém zatěžování má velký vliv na únavovou životnost. Křivka S-N je závislá na středním napětí takovým způsobem, že tahové střední napětí má tendenci snižovat počet cyklů do lomu, zatímco tlakové střední napětí má tendenci životnost prodlužovat. Ve vysoko cyklové oblasti je vliv středního napětí nejvíce patrný, čehož si můžeme všimnout na **obr. 26**. Jako nejrozumnější vysvětlení tohoto vlivu se jeví názor, že střední napětí ovlivňuje celý únavový proces. To znamená že, urychluje stádium šíření únavových trhlin a zkracuje délku trhliny, při které vzniká náhlý lom. Je zcela možné, že zkracuje i stádium nukleace tím, že zmenšuje kritický rozměr primární trhliny [26].



**Obr. 26** Vliv středního napětí na S-N diagram [31]

Asymetrie zátěžného cyklu má významný vliv na hodnotu meze únavy. Wöhlerova křivka určuje pouze mez únavy pro cyklus symetrický. U asymetrického cyklu se pro zjištění hodnot meze únavy využívá Smithův nebo Haighův diagram. Na **obr. 27** je zobrazen Smithův diagram [27].



**Obr. 27** Smithův únavový diagram [27]

Smithův únavový diagram zobrazuje vztah mezi hodnotami meze únavy pro různé druhy asymetrie cyklu. Na ose x je v diagramu zobrazeno statické předpětí  $\sigma_m$  a na ose y je zobrazena amplituda cyklu  $\sigma_a$ , horní a dolní napětí cyklu ( $\sigma_h$ ,  $\sigma_n$ ). Přímka je vedena počátkem souřadnic pod úhlem  $45^\circ$ , To znamená, že souřadnice libovolně zvoleného bodu na této přímce odpovídá velikosti středního napětí  $\sigma_m$ , okolo kterého kmitá napětí o amplitudě  $\sigma_a$  [27].

#### 4.6.2 Vliv druhu zatěžování

Rozhodující vliv na mez únavy má druh zatěžování. Pro tři základní druhy zatěžování (tah-tlak, ohyb, krut) je možno vyjádřit přibližné vztahy mezi hodnotami meze únavy takto:

$$\sigma_{oc} = 1,3 \cdot \sigma_c = 1,73 \cdot \tau_c \quad (15)$$

$$\sigma_{oc} = 1,3 \cdot \sigma_c = 1,55 \cdot \tau_c \quad (16)$$

kde:

- $\sigma_{oc}$  – mez únavy v ohybu,
- $\sigma_c$  – mez únavy v tahu a tlaku,
- $\tau_c$  – mez únavy v krutu [27].

Vztah (15) se využívá pro oceli, zatímco vztah (16) pro tvárné litiny [27].

#### 4.6.3 Vliv velikosti součástí

Základní měření pro stanovení Wöhlerovy křivky a hodnoty meze únavy se stanovují na válcovitých hladkých vzorcích o rozměrech 6 - 10 mm. Pokud bychom chtěli využít těchto výsledků na rozměrnější strojní součásti, musíme znát vliv velikosti vzorku na mez únavy. Při zatěžování v krutu a v ohybu se tento vliv vyjadřuje pomocí velikosti součinitele součástí  $K_V$ :

$$K_V = \sigma_{ocd} / \sigma_{oc} \quad (17)$$

kde:

- $\sigma_{ocd}$  – mez únavy v ohybu vzorku
- $\sigma_{oc}$  – mez únavy vzorku o rozměru 6 – 10 mm

Pro namáhání ohybem i krutem můžeme použít stejné hodnoty součinitele velikosti  $K_v$ , které se s vzrůstajícím rozměrem snižují. Při namáhání tahem-tlakem nemá velikost hladkých vzorků na mez únavy téměř žádný vliv [27].

#### 4.6.4 Vliv vrubů

U strojních součástí se někdy vyskytují vady neboli (náhlé změny průřezů, drážky, otvory atd.), které mají vliv na únavové vlastnosti. V těchto vrubech se vytváří koncentrace napětí a snižuje se tak mez únavy materiálu. Největší koncentrace napětí a deformace vzniká v kořeni vrubu. Tento kořen se tak stává místem iniciace trhliny. Snížení meze únavy účinkem vrubu je definováno vrubovým součinitelem  $K_f$ :

$$K_f = \sigma_c / \sigma_{cv} \quad (18)$$

kde:

$\sigma_c$  – mez únavy hladkého tělesa

$\sigma_{cv}$  – mez únavy tělesa s vrubem

Čím je hodnota  $K_f$  menší, tím jsou vlastnosti materiálu pro danou geometrii a velikost vzorku lepší [27].

#### 4.6.5 Vliv stavu povrchu

Stav povrchu má významný vliv na únavové vlastnosti. Jak bylo uvedeno již v předchozí kapitole **4.5.2 Stádium nukleace únavových trhlin**, tak ke vzniku trhlin dochází na povrchu materiálu, v místech koncentrace napětí. Zvýšení lokální koncentrace napětí může zapříčinit také nejjemnější broušení. Vliv stavu povrchu těles na mez únavy se vyjadřuje součinitelem stavu povrchu  $K_p$ :

$$K_p = \sigma_{cp} / \sigma_c \quad (19)$$

kde:

$\sigma_{cp}$  – mez únavy tělesa s danou drsností povrchu

$\sigma_c$  – mez únavy tělesa s leštěným povrchem o drsnosti  $R_a = 0,025$  mm

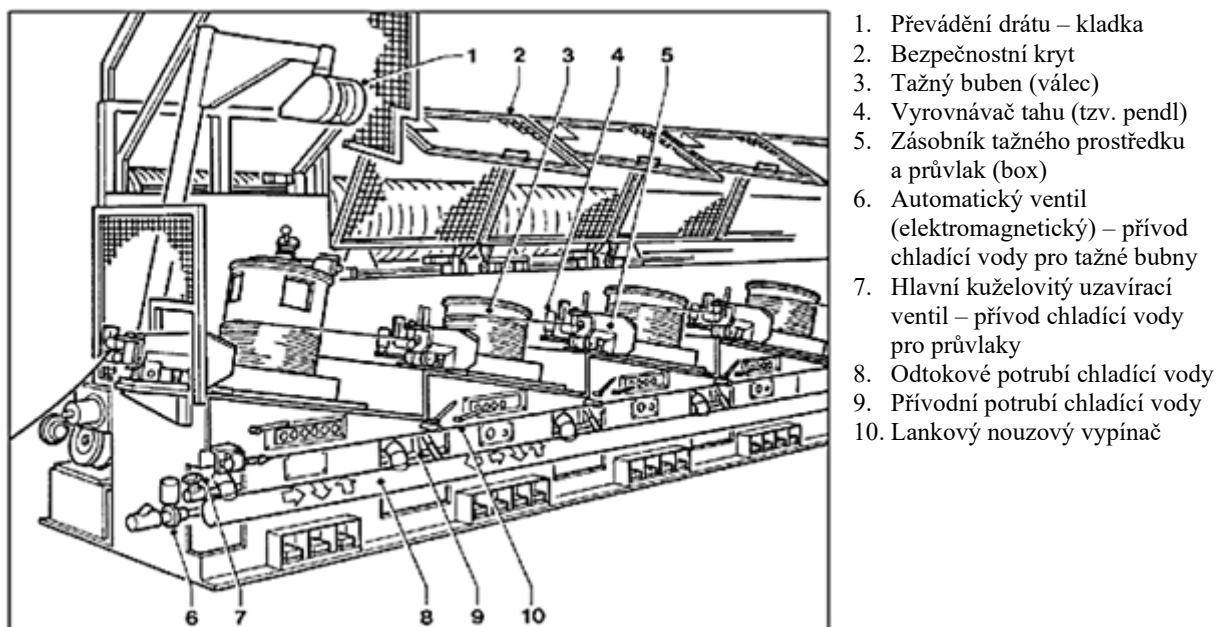
Součinitel stavu povrchu  $K_p$  je závislý na pevnosti materiálu  $R_m$ , přičemž s rostoucí hodnotou pevnosti hodnota stavu součinitele klesá. Materiály o vyšší pevnosti jsou tedy více závislé na stavu povrchu než materiály o nízké pevnosti. Dalšími faktory, které mají vliv na velikost meze únavy jsou teplota, přítomnost apriorních trhlin, frekvence zatěžování, agresivita okolního prostředí, zbytková pnutí v povrchové vrstvě a chemicko-tepelné zpracování [27].

## 5 Technologie tažení za studena a zkoušení únavových vlastností ocelových drátů pro lana v ŽDB Bohumín

V rámci této diplomové práce proběhla vlastní technologie tažení a všechny její předpřípravné operace stejně jako následné zkoušky únavy na stroji Schenck PUL N v areálu ŽDB Bohumín.

### 5.1 Technologie tažení za studena

Na **obr. 28** je zobrazeno schéma vícetahového drátotahu KOCH KGT 20/13, kde probíhalo finální tažení drátu s popisem jednotlivých zařízení. Dále jsou uvedeny technická data drátotahu.



**Obr. 28** Schéma a popis drátotahu KOCH KGT 20/13 [32]

Na následujících **obr. 29 a 30** je zobrazen drátotah KOCH KGT 20/13 v areálu ŽDB Bohumín.





**Obr. 29** *Drátotah KOCH KGT 20/13  
se zavřenými bezpečnostními kryty*



**Obr. 30** *Drátotah KOCH KGT 20/13  
s otevřenými bezpečnostními kryty*

**Obr. 31 a 32** znázorňuje tažný buben a výstup drátu ze skříňky s průvlakem.



**Obr. 31** *Tažný buben*



**Obr. 32** *Výstup drátu ze skříňky  
s průvlakem*

#### **Technická data drátotahu**

- Materiál drátu: patentovaný ocelový drát třídy 12
- Obsah uhlíku: maximálně 0,95 %
- Povrch drátu: holý, pozinkovaný
- Vstupní průměr drátu: 3,5 až 5,5 mm
- Výstupní průměr drátu: 0,8 až 1,4 mm
- Výstupní tažná rychlost: maximálně 25,00 m/s
- Výkon motoru (na 1. až posledním tahu): 30 KW
- Nejnižší počet tahů: 4 tahy [32]

## 5.2 Zkoušení únavových vlastností – Schenck PUL N

### 5.2.1 Rozsah použití

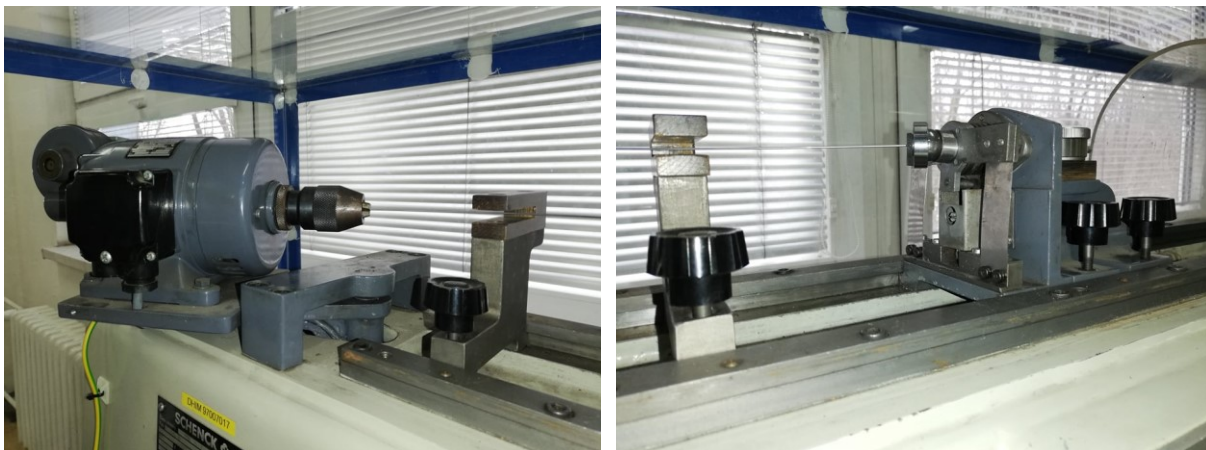
Únavový stroj Schenck PUL N, který je zobrazen níže na **obr. 33**, je strojní zařízení, které slouží pro zjišťování únavových vlastností jako je mez únavy apod. Zařízení je sestrojeno pro zkoušení především drátů z oceli. V průběhu zkoušky je vzorek drátu vystaven kmitavému napětí. Zkoušení je možné pouze za prostého střídavého zatížení a není možné nanést žádné stálé předpětí, dodatečně. Zařízení je sestrojeno pro rozsah průměrů 0,5 až 4 mm. Je rovněž možné ovlivnit rychlost zkoušení v rozmezí 2 000 až 6 000 otáček za minutu [32].



*Obr. 33 Únavový stroj Schenck PUL N*

### 5.2.2 Konstrukční řešení stroje

Stroj je konstruován tak, že obsahuje dvě hlavní části. Skládá se z poháněného motoru, na které je připevněno sklíčidlo a počítadlo otáček. Druhá část je posunovatelné siloměrové zařízení a vypínací kontakt [32].



**Obr. 34** Únavový stroj Schenck PUL N  
*Vlevo: Pevná část obsahující motor, sklíčidlo a počítadlo otáček  
 Vpravo: Posunovatelná siloměrová část*

Dále je stroj opatřen motorovým spínačem a regulačním odporem k nastavení počtu otáček. Motor pohonu je ve strojním poli uložen výkyvně kolem svislé osy a je pomocí protizávaží vyvážen pro veškeré úhlové pozice. Konec hřídele je přes šnekové ústrojí spojen s počítadlem zatěžovacích cyklů. Převod n počítadla je v měřítku 1:30, takže číslo, které uvádí počítadlo, je třeba násobit třiceti pro přesný počet otáček. Motor je poháněn střídavým proudem [32].

Vzorek drátu je tedy před samotným průběhem na jednom konci upevněn ve sklíčidle u motoru a druhý konec je vsunut do mezipouzdra, které je dále zasunuto do protikusu s kulovitou hlavou. Tento protikus je podepřen na ložiskách v siloměrovém zařízení. Drát je díky tomuto podepření a kulové hlavě veden na jednom konci bez vůle a postranního tlaku. Koncové protikusy jsou dva. Menší protikus je používán pro průměry 0,5 až 1 mm a pro dráty většího průměru do 4 mm je používán větší protikus. Mezipouzdra jsou používána pro škálu průměrů: 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,5; 3,8; 4,0 mm [32].

### 5.2.3 Návod pro obsluhu

1. Stroj je nutné zapojit s předpokládaným zdrojem proudu 220 V střídavého proudu.
2. Dále je nutné odebrat první zkušební vzorek, který se nachystá dle **kapitoly č. 7.2 Popis experimentu**.
3. Připravený zkušební vzorek musí být upnut jedním koncem ve sklíčidle u motoru a druhý konec se nasadí na odpovídající mezipouzdro, dle daného průměru, které je

dále zasunuto do koncového kusu s kulovitou hlavou. Následně se vzorek kulovitou hlavou opře o ložiska zabudované se siloměrovým zařízením.

4. Siloměrové zařízení lze posouvat, a tak přivádět vzorek k požadovanému vybočení. Při dosažení daného vybočení je nutné měřicí stojan zajistit postranními šrouby. Vybočení zkušební vzorku je nutné provádět na druhou stranu od strany, kde stojí obsluha.
  5. Pomocí posuvného měřítka se zjistí max. hodnota průhybu.
  6. Po zatížení je nutné odečíst číslicový indikátor, který ukazuje vyšší hodnotu dílků než před zatížením. Tímto lze vypočíst tlakovou sílu v kg. Více v **kapitole č. 7.2**
- Popis experimentu.**
7. Posuvné měřítko se odstraní a nasadí se dorazový stojan, který je ve vzdálenosti 2/5 délky drátu od sklíčidla na straně motoru.
  8. Na stroj je nutné před spuštěním nasadit ochranný kryt.
  9. Otočný knoflík počtu otáček je nutné otočit před nastavením na nulu. V opačném případě není možné stroj spustit.
  10. Když svítí zelená žárovka, tak je stroj připravený k provozu.
  11. Stisknutím zeleně svítícího tlačítka a otočením knoflíku při zvyšování otáček se stroj uvede do provozu. Zelená kontrolní žárovka zhasne. Červená kontrolní žárovka se rozsvítí a indikuje provoz stroje.
  12. Při lomu zkoušky se stroj samočinně vypínačem uvede do klidu. Počet výsledných cyklů je nutné odečíst od předešlého čísla a násobit 30. Zaznamenat k příslušnému napětí.
  13. Vypnout stroj ručně [32].

## 6 Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je zjistit a popsat vliv rychlosti tažení drátu pro ocelová lana na únavě materiálu, zásobu plasticity a rychlost zpevňování. Ke splnění tohoto cíle je potřeba splnit tyto dílčí cíle:

1. Vyrobit holé lanové fosfátové dráty dle normy ČSN EN 10264-2 jakosti C68DP s finální pevností 1 570 MPa a jakosti C86D2 s finální pevností 2 160 MPa s použitím 3 variant rychlostí tažení 6, 8 a 10 m/s.
2. Otestovat mechanické vlastnosti včetně únavy.
3. Provést srovnání naměřených výsledků.

**Vzhledem k citlivosti údajů ŽDB Drátovny a.s. jsou naměřená data zveřejněna v samostatné výzkumné zprávě (původní DP) ŽDB Drátovny a.s. [32].**

## 7 Návrh experimentu

### 7.1 Použitý materiál

Experiment se týkal drátů pro ocelová lana o finálním průměru 1,2 mm. Pro tento experiment byly vybrány oceli jakosti **C68DP** - finální drát s pevností 1 570 MPa a jakost **C86D2** - finální drát s pevností 2 160 MPa. Chemické složení oceli pro jakost C68DP udává **tabulka 1** a pro jakost C86D2 **tabulka 2**.

**Tabulka 1** Chemické složení použité oceli jakosti C68DP s pevností 1 570 MPa (hm. %) [32]

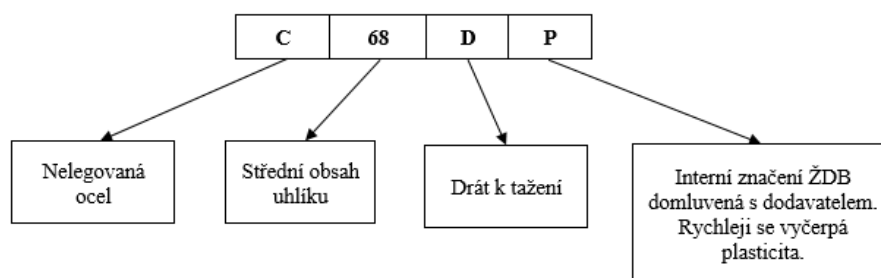
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
0,695	0,62	0,203	0,011	0,010	0,05	0,03	0,04
Mo	V	Ti	Al	W	Nb	B	N
0,007	0,002	0,0008	0,001	0,01	0,001	0,0002	0,0033
As	Sn	Co	Sb	Zr	Pb	Zn	Mg
0,003	0,004	0,004	0,001	0,001	0,0010	0,001	0,0001

**Tabulka 2** Chemické složení použité oceli jakosti C86D2 s pevností 2 160 MPa (hm. %) [32]

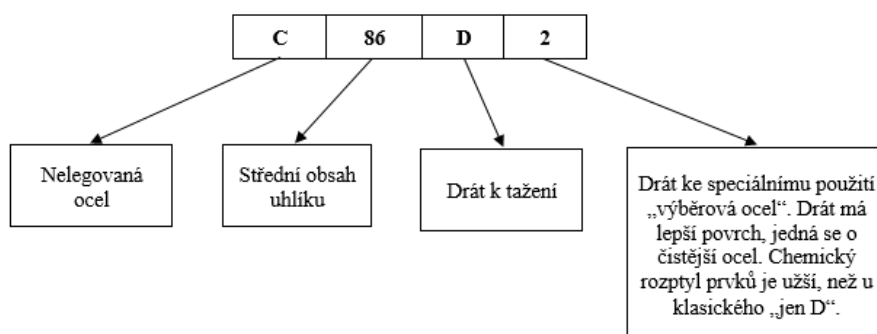
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
0,877	0,62	0,202	0,010	0,010	0,03	0,03	0,06
Mo	V	Ti	Al	W	Nb	B	N
0,012	0,002	0,0008	0,001	0,01	0,001	0,0002	0,0043
As	Sn	Co	Sb	Zr	Pb	Zn	Mg
0,002	0,003	0,003	0,001	0,001	0,0010	0,001	0,0001

#### 7.1.1 Použité oceli

Na **obr. 35** a **36** jsou uvedeny použité značky ocelí experimentu a jejich popis.



**Obr. 35** *Popis značky použité oceli C68DP*



**Obr. 36** *Popis značky použité oceli C68D2*

### 7.1.2 Přehled mechanických vlastností použitých ocelí

V tomto experimentu byly vyrobeny holé fosfátované lanové dráty dle normy ČSN EN 10264-2. Minimální požadavky mechanických vlastností ocelí pro finální dráty s pevností 1 570 MPa udává **tabulka 3** a pro finální dráty s pevností 2 160 MPa **tabulka 4**.

**Tabulka 3** *Přehled požadavků na minima mechanických vlastností pro dráty s pevností 1 570 MPa dle normy ČSN EN 10264-2 [33]*

<b>R<sub>m</sub> (MPa)</b>	<b>N<sub>o</sub> (3.75) zk. ohybem</b>	<b>N<sub>k</sub> (100xd) zk. krutem</b>
1 570	16	28

**Tabulka 4** *Přehled požadavků na minima mechanických vlastností pro dráty s pevností 2 160 MPa dle normy ČSN EN 10264-2 [33]*

<b>R<sub>m</sub> (MPa)</b>	<b>N<sub>o</sub> (3.75) zk. ohybem</b>	<b>N<sub>k</sub> (100xd) zk. krutem</b>
2 160	12	20



## 7.2 Popis experimentu

U obou jakostí drátů C68DP a C86D2, které byly použity v této diplomové práci (viz kapitola 7.1 Použitý materiál), byl výrobní postup stejný. Rozdílný je pouze počet úběrů při tažení předtahu a s tím spojené tažení finálního drátu vzhledem k rozdílným mechanickým vlastnostem materiálů.

### 7.2.1 Výrobní postup experimentu

#### Jakost C68DP pevnost 1 570 MPa:

1. moření,
2. tažení předtahu:  $d_0 = 5,5$  mm na  $d_n = 2,30$  mm,
3. patentování,
4. fosfátování,
5. tažení finálního drátu  $d_0 = 2,30$  na  $d_n = 1,20$  mm (celkový úběr 72,78 %).

#### Jakost C86D2 pevnost 2 160 MPa:

1. moření,
2. tažení předtahu:  $d_0 = 5,5$  mm na  $d_n = 3,65$  mm,
3. patentování,
4. fosfátování,
5. tažení finálního drátu:  $d_0 = 3,65$  na  $d_n = 1,20$  mm (celkový úběr 89,19 %).

### 7.2.2 Detailní popis tažení finálního drátu.

Drát s počátečním průměrem 2,30 mm s pevností v tahu 1 570 MPa byl tažen 7 úběry na průměr 1,2 mm. Celková poměrná deformace tedy činila 72,78 % (což představuje skutečnou logaritmickou deformaci  $\ln(1,20^2/2,30^2) = -1,3$ ). Drát s počátečním průměrem 3,65 mm s pevností v tahu 2 160 MPa byl tažen 11 úběry na průměr 1,2 mm. Celková poměrná deformace tedy činila 89,19 % (což představuje skutečnou logaritmickou deformaci  $\ln(1,20^2/3,65^2) = -2,22$ ). **Tabulka 5** udává průchodovou řadu průvlaků s velikostí poměrných dílčích úběrů pro drát s pevností 1 570 MPa a následující **tabulka 6** pro drát s pevností 2 160 MPa [32].



**Tabulka 5** Průchodová řada průvlaků s procentuálním vyjádřením dílčích poměrných úběrů pro pevnost 1570 MPa jakost C68DP [32]

Tah	1	2	3	4	5	6	7
Průvlaky (mm)	2,12	1,94	1,76	1,60	1,45	1,32	1,20
Úběry %	15,04	16,26	17,70	17,36	17,87	17,13	17,36

**Tabulka 6** Průchodová řada průvlaků s procentuálním vyjádřením dílčích poměrných úběrů pro pevnost 2160 MPa jakost C86D2 [32]

Tah	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Průvlaky (mm)	3,38	3,02	2,70	2,40	2,15	1,94	1,75	1,59	1,45	1,32	1,20
Úběry %	14,25	20,17	20,07	20,99	19,75	18,58	18,63	17,45	16,83	17,13	17,36

Tažení drátu pro obě pevnosti ocelí se provádělo přes tvrdokovové průvlaky ze slinutých karbidů, který je zobrazen na následujících **obr. 37** a **38**.



**Obr. 37** Vstupní část průvlaku S3



**Obr. 38** Výstupní část průvlaku S3

Následující **tabulka 7** udává rozdělení průvlaků podle velikosti objímky, kde D značí průměr objímky a H značí šířku objímky. Pro náš experiment byly zvoleny typy průvlaku S2 a S3.

**Tabulka 7** Rozdělení průvlaků pro finální tah podle velikosti objímky [32]

Typ průvlaku	D (mm)	H (mm)
S2	43	25
S3	43	32

Při tažení bylo použito práškové mazivo Traxit GT60 a Condat 1869. Tažná rychlost byla stanovena u obou zkoušených jakostí oceli na 6, 8 a 10 m/s.

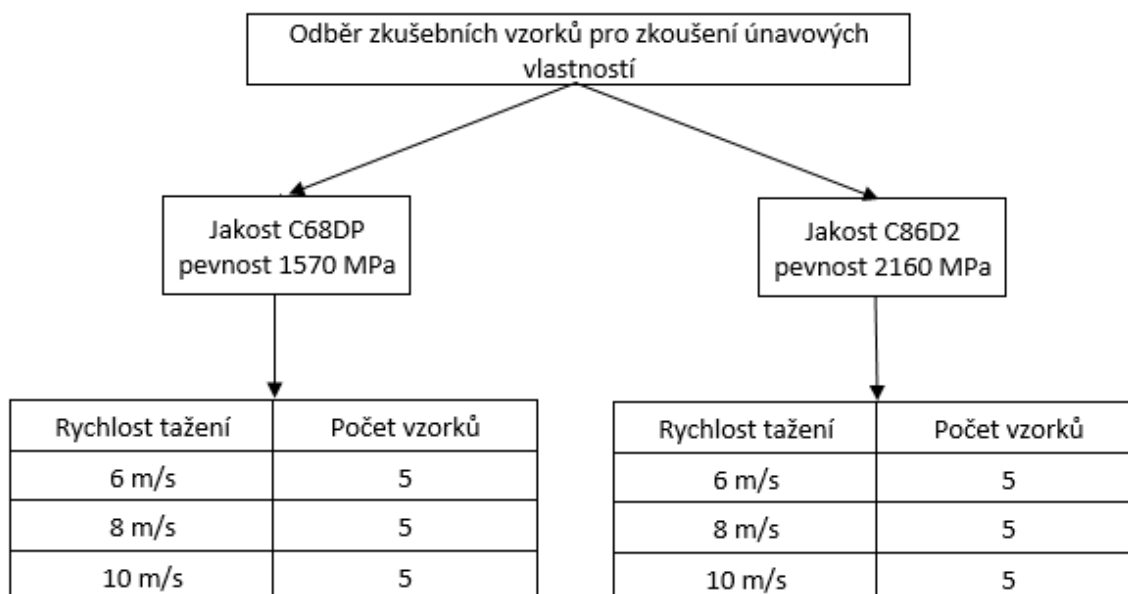
### 7.2.3 Rozdělení a odběr zkušebních vzorků

Celkem tedy bylo k experimentu zkoušení mechanických a únavových vlastností vzhledem k rychlosti tažení připraveno 6 cívek ocelí, které jsou zobrazeny na **obr 39**.



**Obr. 39** 6 cívek 2 pevností po finálním tažení rychlosti 6, 8 a 10 m/s

Z každé jednotlivé cívky byly odebrány vzorky drátu, které byly označeny podle pevnosti a použité rychlosti tažení. Pro lepší přehlednost slouží následující **obr. 40**.



**Obr. 40** Popis odebraných vzorků vzhledem k rychlosti a jakosti oceli

Délka zkušební vzorku se stanovila dle rovnice (20). V našem případě byl průměr drátu 1,2 mm. Délka zkušební vzorku tedy činila 240 mm.

$$l = 200 \cdot d \quad (20)$$
$$240 = 200 \cdot 1,2$$

kde:

- $l$  – délka zkušební vzorku [mm],
- $d$  – průměr zkušební vzorku [mm] [32].

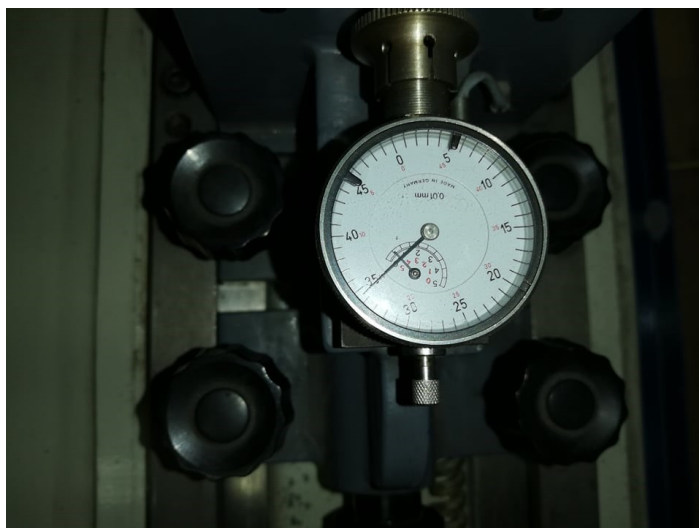
#### 7.2.4 Zkouška únavy

Pro zkoušení únavy byla vytvořena výpočtová tabulka ke stroji Schenck PUL N pro každý vzorek samostatně. Tato výpočtová tabulka je zobrazena na následujícím **obr. 41**, kde je uveden příklad, jak probíhalo zkoušení únavových vlastností u prvního zkušební vzorku jakosti C68DP a rychlosti tažení 8 m/s. U dalších vzorků se tento postup dále opakoval. Hodnoty vyznačené žlutě jsou vstupní hodnoty, které je možno přepisovat.

Údaje pro únavovou zkoušku			
Jakost: C68DP	Pevnost: 1570 MPa		Rychlost: 8 m/s
Průměr: (d)	Délka:	Průhyb:	Pružina:
1,2 mm	240 mm	45 mm	0,6 kg
Počet dílků indikátoru:			
Bez zatížení:	Se zatížením:	Odečet dílků:	
90	110	20	
Tlaková síla (P):		0,133333 kg	
Moment odporu (W):		0,00017 cm <sup>3</sup>	
Skutečná hodnota průhybu:		44,4 mm	
Působící ohybový moment (Mb):		0,592 kg·cm	
Ohybové namáhání (sigma $\sigma$ ):		34,91389 kg/mm <sup>2</sup>	
Ukazatel počtu cyklů před zkouškou:		756107	cyklů
Ukazatel počtu cyklů po zkoušce:		756352	cyklů
Počet cyklů v celém průběhu namáhání (1:30):		7350	cyklů

**Obr. 41** Výpočtová tabulka pro únavovou zkoušku

Následně byl vzorek upnut do stroje Schenck. Po jeho upnutí jsme do výpočtové tabulky vyplnili průměr vzorku 1,2 mm a pružinu stroje siloměrového rozsahu 0,6 kg. Tyto dvě hodnoty se jako jediné během všech zkoušek ze všech žlutě přepisovatelných hodnot dále neměnily. Dále jsme vyplnily hodnotu ukazatele počtu cyklů před zkouškou 756 107 cyklů. Tato hodnota se z počítadla počtu cyklů nedá vynulovat, takže abychom zjistili celkový počet cyklů po lomu zkušebního vzorku 7 350, tak musíme udělat rozdíl ukazatele počtu cyklu po zkoušce 756 352 – ukazatel počtu cyklu před zkouškou 756 107 a tento rozdíl vynásobit 30. Dále musíme vyplnit hodnotu indikátoru bez zatížení. V našem případě byla tato hodnota 90. Číslicový indikátor si můžeme prohlédnout na následujícím **obr. 42**.



**Obr. 42** Číslicový indikátor stroje Schenck

Namáhání zkoušeného vzorku je vyvoláno průhybem posunovatelným siloměrovým zařízením. Tímto dojde k průhybu vzorku a jeho vybočení z osy, a tím tedy k zatížení. Pokud se již dosáhne požadovaného prohnutí, siloměrové zařízení se zajistí prostřednictvím šroubů.

Míra prohnutí se určuje dle posuvného měřítka, které je přídatnou součástí stroje. Posuvným měřítkem měříme v místě největšího průhybu [32]. Posuvné měřítko zařízení Schenck PUL N si je zobrazeno na **obr. 43**.



**Obr. 43** Posuvné měřítko zařízení Schenck PUL N

Jakmile dojde k prohnutí vzorku, zapíšeme do tabulky průhyb zkušebního vzorku, kde v našem případě se jedná o 45 mm a následně vyplníme v tabulce hodnotu indikátoru po zatížení. V našem případě byla tato hodnota 110. Číselníkový indikátor bez zatížení ukázal hodnotu 90 dílků. Po zatížení vzorkem drátu se hodnota změnila na 110 dílků. Při odečtení obou hodnot dostaneme tzv. propnutí, které činí 20 dílků. Pokud hodnotu propnutí 20 dílků vydělíme hodnotou bez zatížení 90 dílků a vynásobíme silou pružiny 0,6 kg, tak určíme tlakovou sílu  $P = 0,133333$  kg. Axiální síla  $P$ , je určena z indikátoru při indikaci průhybu pružiny [32].

Z průhybu drátu je tedy možné zjistit napětí, které na něj působí. Síla je měřena prostřednictvím šroubových pružin. K dispozici jsou tři vyměnitelné pružiny s různými siloměrovými rozsahy, a to 15 kg, 3 kg a 0,6 kg. V našem případě pro zkoušení všech vzorků byla zvolena pružina s rozsahem 0,6 kg. Tím, že dochází k vybočení drátů, drát způsobí stlačení pružiny a ta pak udává míru pro působící sílu. Působící sílu snímá indikátor, na který působí stlačená pružina. Měřicí indikátor, tak potřebuje ke své indikaci určitý tlak [32].

#### **Měření průhybu zkušebního vzorku:**

Posuvné měřítko se tedy v našem případě dotýká bočně drátu o průměru 1,2 mm a ukazuje hodnotu zatížení 45 mm. Skutečná hodnota míry průhybu  $a_s$  činí:

$$a_s = a - d / 2 \quad (21)$$

$$44,4 = 45 - 1,2/2$$

kde:

$a_s$  – skutečná hodnota průhybu [mm],

$a$  – průhyb zkoušky [mm],

$d$  – průměr drátu [mm] [32].

Moment odporu pro kruhový průřez:

$$W = \pi / 32 \cdot d^3 \quad (22)$$

$$0,00017 = 3,14 / 32 \cdot 0,12^3$$

kde:

$d$  – průměr drátu [cm],

$W$  – moment odporu [cm<sup>3</sup>] [32].

Působící ohybový moment:

$$M_b = P \cdot a_s \quad (23)$$
$$0,592 = 0,133333 \cdot 4,44$$

kde:

$P$  – axiální síla [kg],

$a_s$  – skutečná hodnota průhybu [cm],

$M_b$  – ohybový moment [kg · cm] [32].

Propočet namáhání zkoušky ohybem z axiální tlakové síly a z průhybu zkoušky se určí z následujícího vztahu:

$$\sigma = M_b / W \quad (24)$$
$$34,91389 = 0,592 / 0,00017 / 100$$

kde:

$M_b$  – ohybový moment [cm · kg],

$W$  – moment odporu [cm],

$\sigma$  – namáhání ohybem [kg/mm<sup>2</sup>] [32].

Po zapnutí únavového stroje Schenck nastavíme rychlost otáčení. V našem případě byly vzorky obou jakostí ocelí zkoušeny při rychlosti 4 000 ot/min [32].

Dále je nutno uvést pro jaké ohybové namáhání sigma  $\sigma$  bylo zkoušení únavových vlastností prováděno. Všechny zkušební vzorky byly zkoušeny pod zatížením přibližně 32 kg/mm<sup>2</sup>. Hodnota 32 kg/mm<sup>2</sup> byla zvolena dle návodu pro únavové zařízení Schenck. V rovnici výše (22) pro moment odporu průřezu drátu si můžeme všimnout zadané hodnoty 32,

která je pouze matematická. Tato hodnota nemá nic společného s hodnotou zatížení  $32 \text{ kg/mm}^2$  [32].

Ohybové namáhání  $\sigma$  nám tedy vyšlo přibližně dle našich požadavků na  $34,91389 \text{ kg/mm}^2$ . To, že nám vyšla hodnota dle požadavku, závisí na stanoveném průhybu zkušebního vzorku. Kdybychom stanovili průhyb zkušebního vzorku na 35 mm, tak by se zmenšila tlaková síla snížením hodnoty číslcového indikátoru po zatížení a nedosáhli bychom na naši požadovanou hodnotu  $32 \text{ kg/mm}^2$ . Pro zajištění žádaného zatížení jsme tedy správně nastavili průhyb zkušebního vzorku na 45 mm, kdy tlaková síla byla stanovena na  $0,13333 \text{ kg}$ .

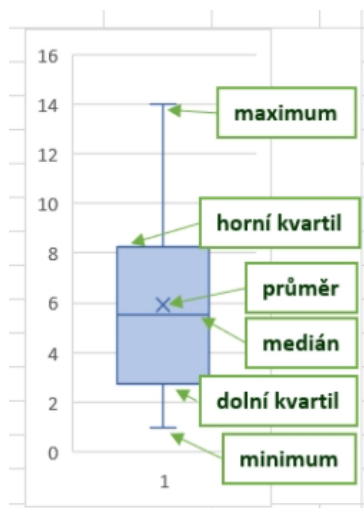
Prohnutí zkušebního vzorku oceli jakosti C68DP s pevností  $1\,570 \text{ MPa}$  a prohnutí zkušebního vzorku oceli jakosti C86D2 s pevností  $2\,160 \text{ MPa}$  nám splnilo požadavek ohybového namáhání  $\sigma$  pro únavový stroj Schenck  $32 \text{ kg/mm}^2$ .



## 8 Diskuze výsledků

### 8.1 Krabicový graf

Pro grafické zobrazení naměřených dat byl v této diplomové práci použit *Krabicový graf s fousy*, který je nově jednou z voleb v Microsoft Excel. Vysvětlení hodnot zobrazených v *Krabicovém grafu s fousy* je provedeno na **obr 44**.



**Obr. 44** Popis významnosti jednotlivé krabice v krabicovém grafu [34].

Fousy grafu představují nejvyšší hodnotu z vybraných hodnot. resp. nejnižší hodnotu z vybraných hodnot. Pokud však algoritmus programu vyhodnotí, že se mezi daty vyskytují odlehlé hodnoty, představují fousy 1,5násobek příslušného kvartilového rozpětí a odlehlé hodnoty jsou zobrazeny jako samostatné body mimo fousy. Krabice grafu je ohraničena horním, resp. dolním kvartilem což jsou hodnoty, která odděluje nejvyšší, resp. nejnižší čtvrtinu z vybraných hodnot. V krabici grafu se tak nachází polovina všech naměřených hodnot. Čára v krabici představuje medián, který dělí vybrané hodnoty na dvě poloviny. Aritmetický průměr je v grafu označen křížkem. Rozdíl mezi mediánem a průměrem pak odpovídá míře sešikmení dat. Rozpětí nám udává hodnotu maximum – minimum. Čím větší rozpětí, tím větší vzdálenost horního vousu krabice (maxima) od spodního vousu krabice (minima). *Krabicový graf s fousy* se skvěle hodí pro porovnávání skupin naměřených hodnot, protože kromě číselných charakteristik polohy (mediánu a průměru) zobrazuje i variabilitu dat (rozpětí a kvartilové rozpětí). Za statisticky významně odlišná data, pak můžeme považovat ty, jejichž krabice se nepřekrývají [35].

## 8.2 Tažený drát z jakosti C68DP

### 8.2.1 Data a popisná statistika mechanických vlastností a zkoušek

V **tabulce 8** jsou uvedeny výsledky mechanických vlastností tahové zkoušky, zkoušky krutem, ohybem a číselné charakteristiky. Jednotlivé mechanické vlastnosti a zkoušky jsou přiřazeny k dané rychlosti tažení. Pro každou rychlost tažení byly vypočítány statistické údaje jako jsou průměr, směrodatná odchylka, maximum, minimum a rozpětí. Minimální požadované mechanické vlastnosti a zkoušky krutem a ohybem pro drát s pevností 1 570 MPa z jakosti C68DP jsou v **tabulce 3 kapitola 7.1.2 Přehled mechanických vlastností použitých ocelí**.

Vzhledem k citlivosti údajů ŽDB Drátovny a.s. jsou naměřená data zveřejněna v samostatné výzkumné zprávě (původní DP) ŽDB Drátovny a.s. [32].

**Tabulka 8** *Výsledky mechanických vlastností a zkoušky krutem a ohybem u drátů z jakosti C68DP*

Vzorek	Rych. taž. (m/s)	d <sub>0,01</sub> (mm)	F <sub>m</sub> (N)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	A <sub>t</sub> (%)	N <sub>0</sub> (3.75)	N <sub>k</sub> (100·d)	Z (%)
1	6 m/s								
2									
3									
4									
5									
Průměr									
Sm. od.									
Min.									
Max.									
Rozpětí									
1	8 m/s								
2									
3									
4									
5									
Průměr									
Sm. od.									

Vzorek	Rych. taž. (m/s)	d <sub>0,01</sub> (mm)	F <sub>m</sub> (N)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	A <sub>t</sub> (%)	N <sub>o</sub> (3.75)	N <sub>k</sub> (100·d)	Z (%)
Min.	10 m/s								
Max.									
Rozpětí									
1									
2									
3									
4									
5									
Průměr									
Sm. od.									
Min.									
Max.									
Rozpětí									

Z uvedených dat a vypočtených průměrných hodnot je zřejmé, že všechny uvedené hodnoty zkušebních vzorků taženého drátu z jakosti C68DP s pevností 1 570 MPa jsou vyhovující. Pro lepší orientaci jsou na **obr. 45, 46, 47, 48, 49 a 50** znázorněny grafy pro podrobnější porovnání průměrných hodnot, rozpětí, mediánů, horních a dolních hodnot mechanických vlastností a zkoušek za jednotlivých rychlostí tažení. Významnost krabicového grafu je uvedena v **kapitole 8.1 Krabicový graf**. Když začneme porovnávat jednotlivé mechanické vlastnosti a zkoušky, tak se dostaneme k těmto závěrům.

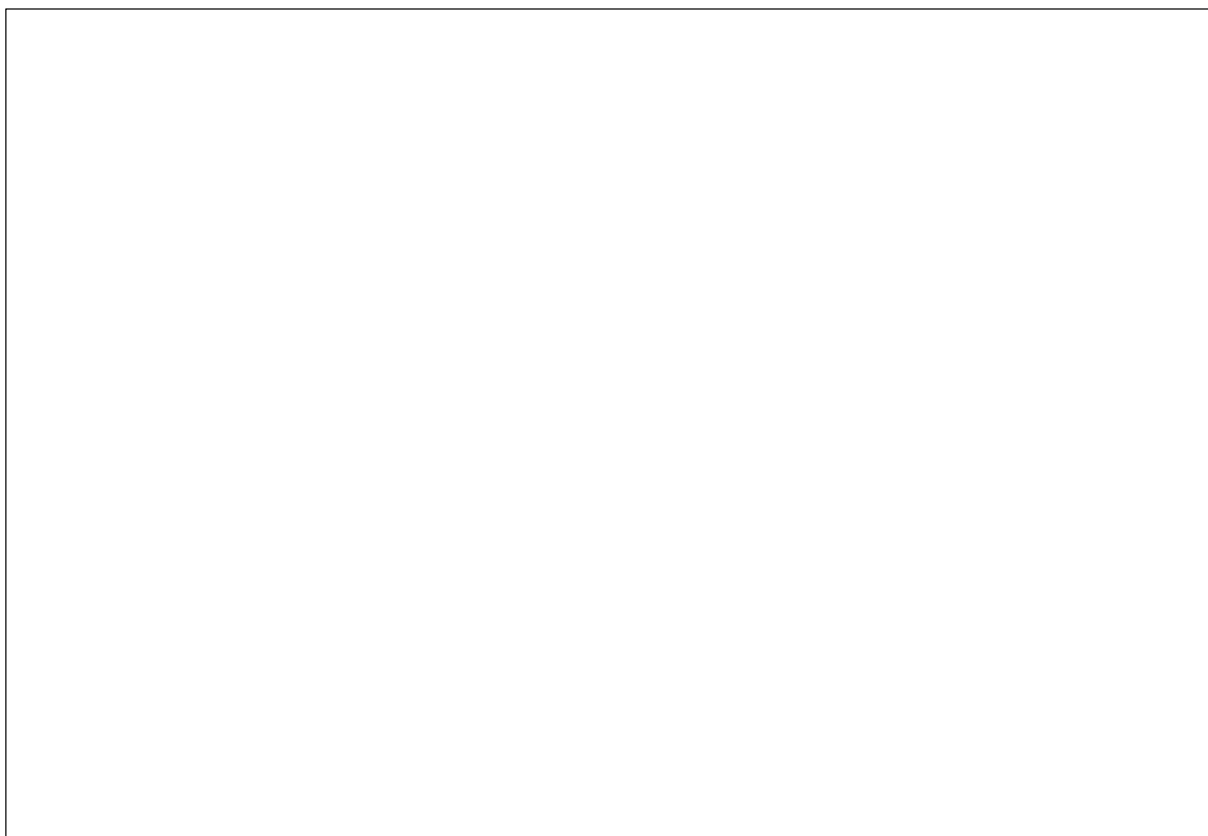
Výsledné průměrné hodnoty pevnosti  $R_m$  vyznačené křížkem, vzhledem k rychlostem tažení 6, 8 a 10 m/s mají lineární průběh. Čím větší rychlost tažení, tím větší pevnost. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot pevnosti od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 8, 10 a 6 m/s. Velikost rozpětí hodnot můžeme rozeznat podle znázorněného grafu, kde vzdálenost horního vousu (maxima) a spodního vousu (minima) krabice určuje celkové rozpětí. Na **obr. 45** si můžeme všimnout, že rozpětí hodnot je jednoznačně největší u rychlosti 6 m/s. Závěrem lze konstatovat, že rychlost tažení má na hodnoty pevnosti statisticky významný vliv.



**Obr. 45** Krabicový graf vypočtených hodnot pevnosti za jednotlivých rychlostí tažení

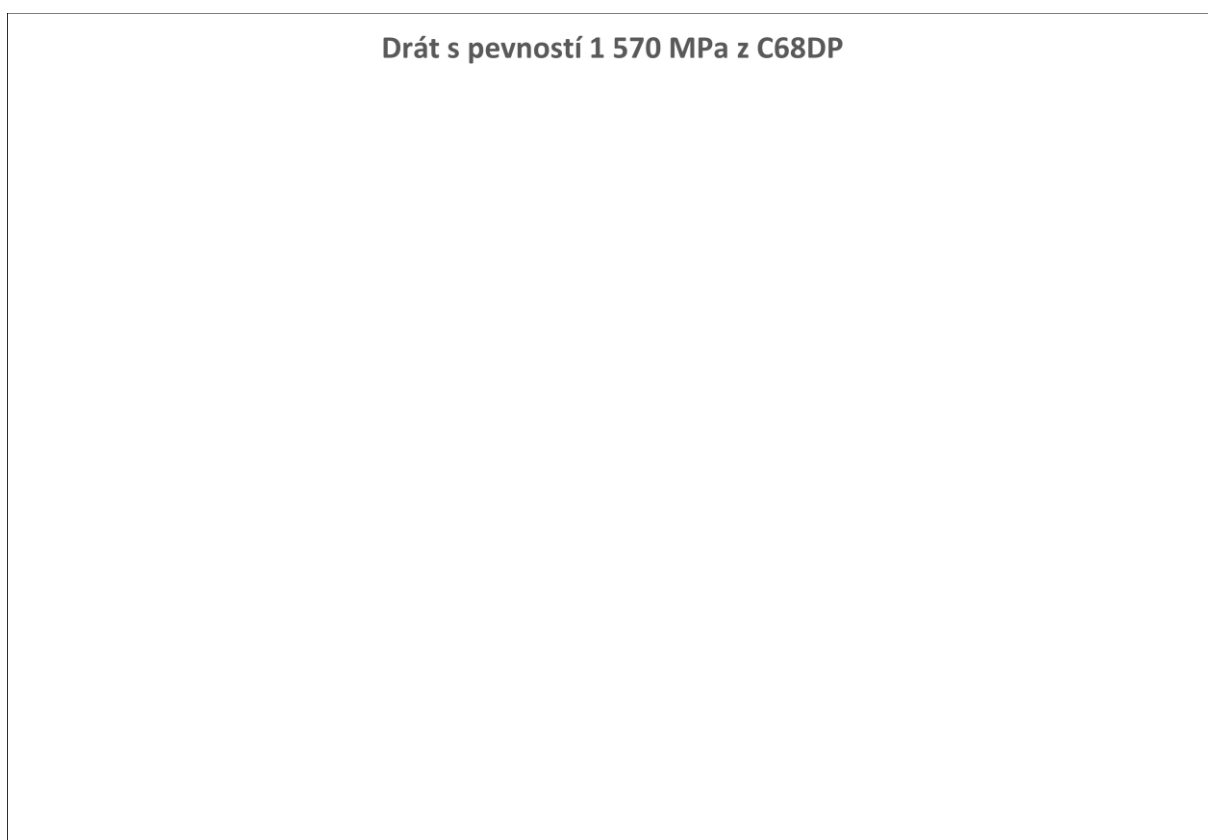
Na **obr. 46** je zobrazen bodový graf vypočtených hodnot pevnosti v závislosti na rychlosti tažení. V grafu je vynesena regresní přímka, která určuje lineární závislost hodnot pevnosti na rychlosti tažení.

Dále je v grafu vyznačen koeficient determinace  $R^2$ , který udává podíl variability závislé proměnné. Koeficient determinace  $R^2$  může nabývat hodnot od 0 do 1, kdy 1 představuje dokonalou predikci (rozptyl hodnot kolem přímky je = 1, tzn. že všechny hodnoty leží na přímce) a 0 nastane v okamžiku, kdy je rozptyl hodnot kolem přímky zcela roven rozptylu hodnot kolem jejich střední hodnoty [36]. Pokud se hodnota  $R^2$  jako v našem případě ( $R^2 = 0,6605$ ) více blíží hodnotě  $R^2 = 1$ , tak se jedná o silnou statistickou závislost. Závěrem lze konstatovat, že vztah mezi finální pevností drátu a rychlostí tažení vykazuje silnou statistickou závislost, kdy s rostoucí rychlostí tažení roste pevnost v tahu, pravděpodobně jako důsledek většího počtu, během plastické deformace vzniklých dislokací.



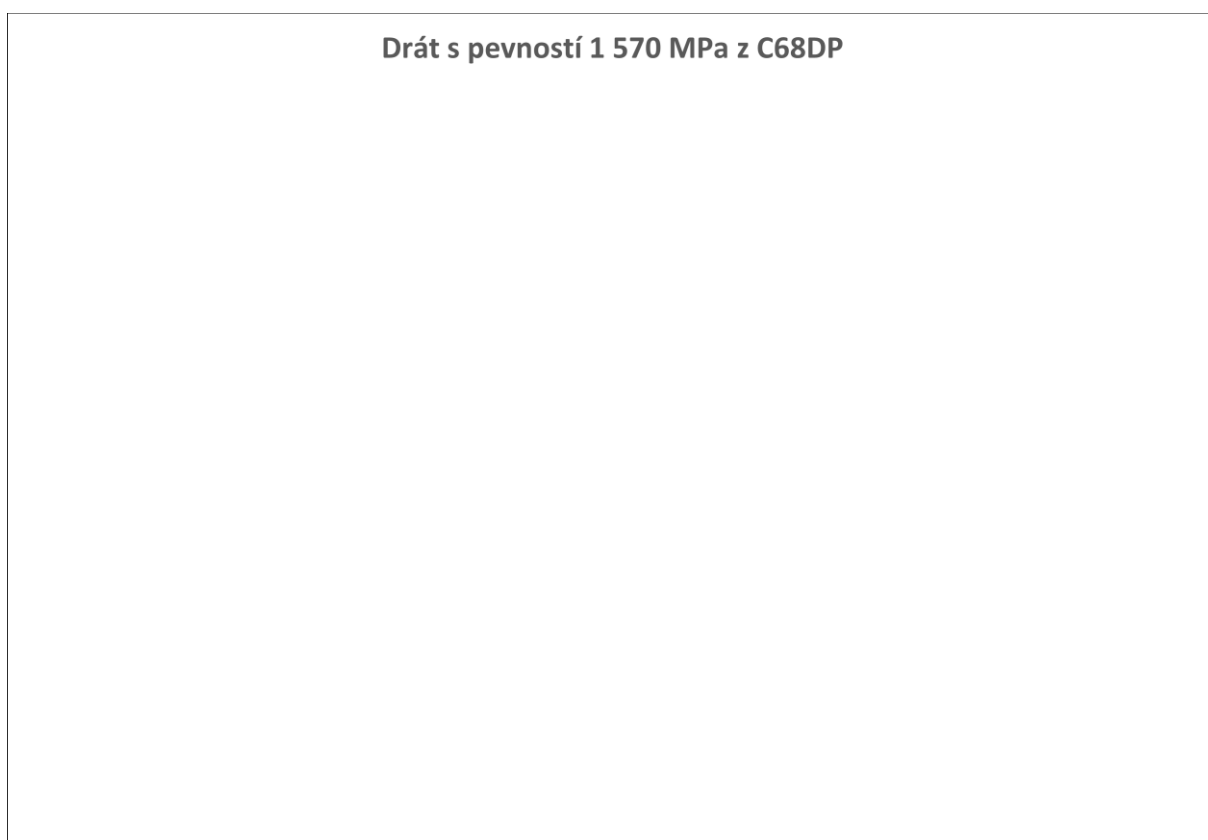
**Obr. 46** Bodový graf vypočtených hodnot pevnosti za jednotlivých rychlostí tažení

Průměrné hodnoty celkové tažnosti  $A_t$  vyznačené křížkem mají překvapivě stejný charakter jako průměrné hodnoty pevnosti. Čím větší rychlost tažení, tím větší tažnost. Obecný předpoklad vzhledem k výsledné pevnosti byl spíše opačný a to, čím větší rychlost tažení, tím menší tažnost. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot tažnosti od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 6, 8 a 10 m/s. Čím větší rychlost tažení, tím větší rozpětí hodnot tažnosti. Na **obr. 47** si můžeme všimnout, že rozpětí hodnot je jednoznačně největší u rychlosti 10 m/s. Vliv rychlosti tažení je méně průkazný než v případě pevnosti, hlavně díky velkému rozpětí naměřených hodnot tažnosti při rychlosti 10 m/s.



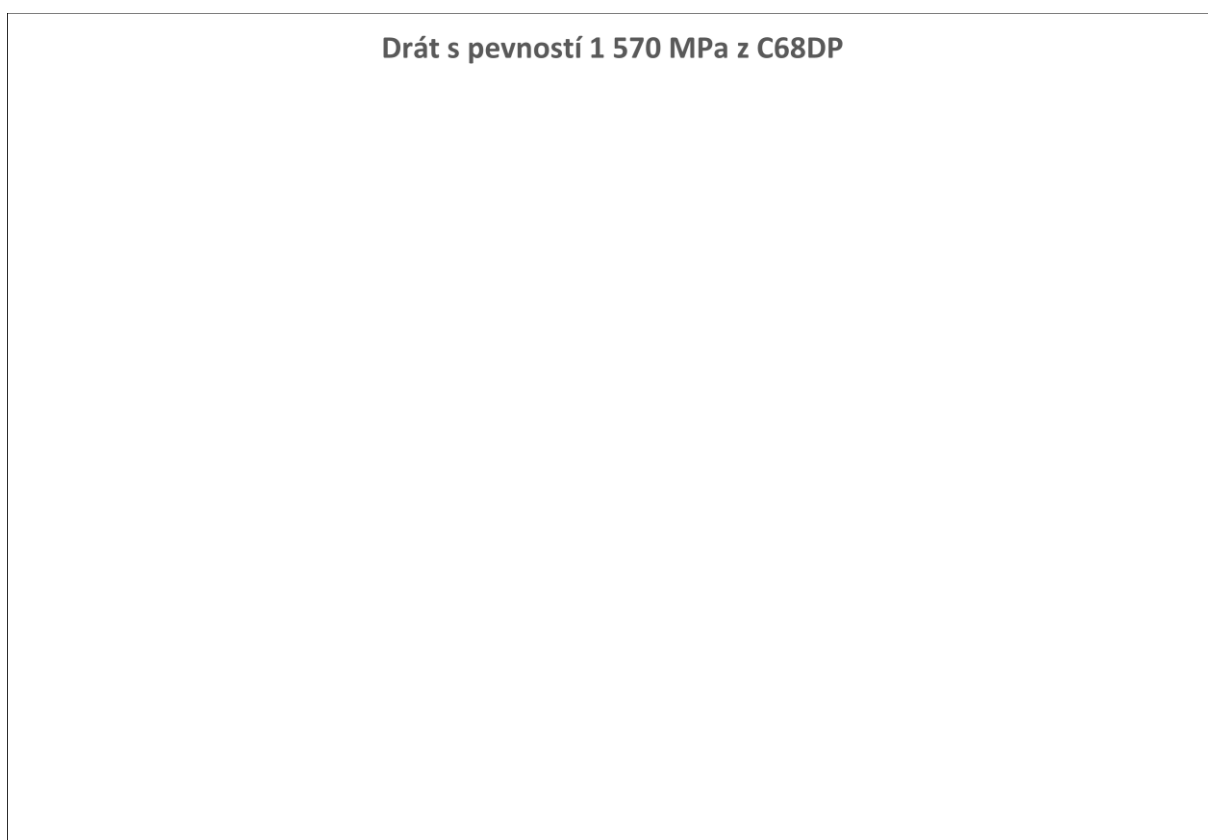
**Obr. 47** Krabicový graf vypočtených hodnot tažnosti za jednotlivých rychlostí tažení

Průměrné hodnoty meze kluzu vyznačené křížkem mají stejný charakter jako pevnost a tažnost. S rostoucí rychlostí tažení, roste hodnota meze kluzu. Hodnota meze kluzu u rychlosti 10 m/s je sice menší, než hodnota u rychlosti 8 m/s, ale rozdíl je téměř zanedbatelný. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot meze kluzu od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 8, 10 a 6 m/s. Na **obr. 48** si můžeme všimnout, že rozpětí hodnot je jednoznačně největší u rychlosti 6 m/s. Znatelný rozdíl rychlosti tažení je pouze mezi nejnižší rychlostí (6 m/s) a dalšími rychlostmi. Data pro nejnižší rychlost však vykazují poměrně velké rozpětí.



**Obr. 48** Krabicový graf vypočtených hodnot meze kluzu za jednotlivých rychlostí tažení

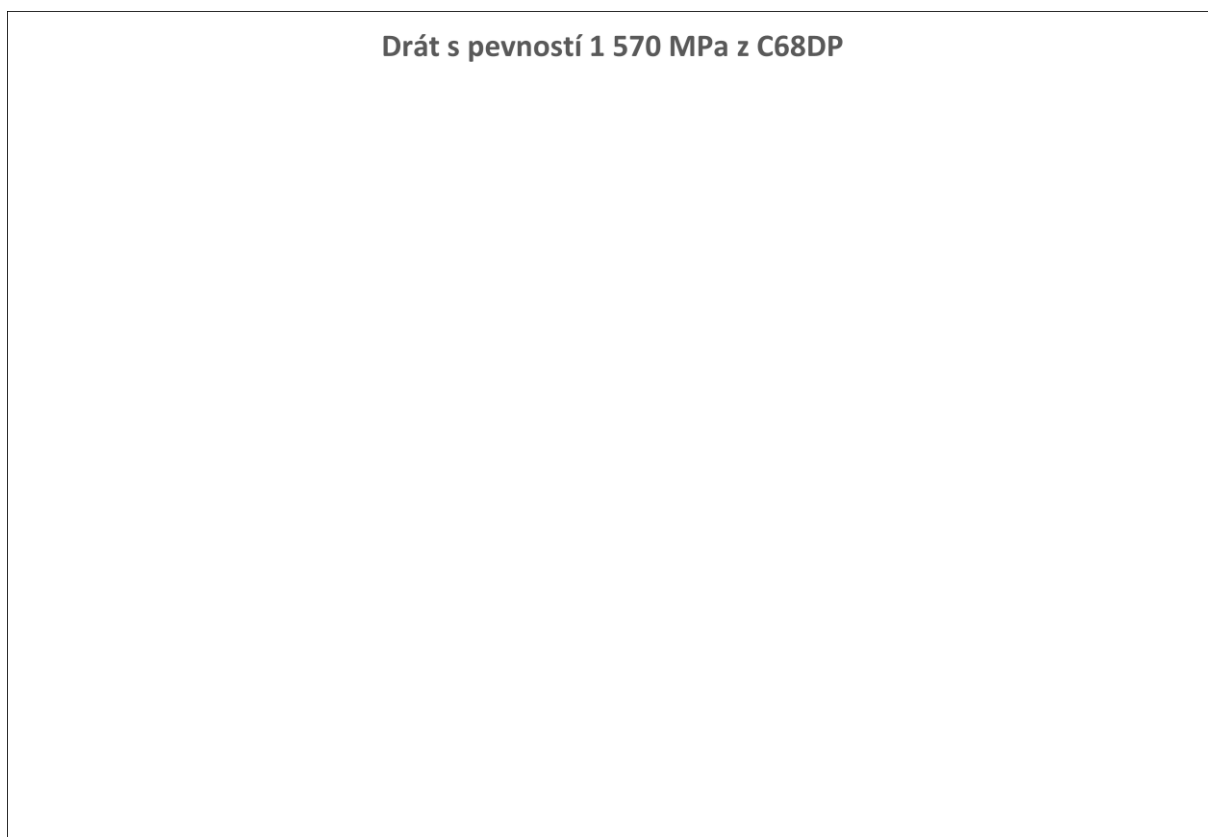
Průměrné hodnoty zkoušky ohybem  $N_o$  mají téměř stejný charakter jako pevnost, tažnost a mez kluzu, kdy s rychlostí roste počet ohybů. Průměrná hodnota počtu ohybů u rychlosti 6 m/s je sice o jeden ohyb větší, než hodnota u rychlosti 8 m/s, ale následná hodnota 34 ohybů nám určuje, že s rychlostí se bude počet ohybů zvyšovat. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot zkoušky ohybem od nejmenšího po největší, tak z **obr. 49** si můžeme všimnout, že rychlost 6 a 8 m/s se vyznačují stejně velkým rozpětím a rychlost 10 m/s se vyznačuje největším rozpětím. Vliv rychlosti tažení je neprůkazný hlavně díky velkému rozpětí hodnot pro rychlost 10 m/s.



**Obr. 49** Krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky ohybem za jednotlivých rychlostí tažení



Průměrné hodnoty zkoušky krutem  $N_k$  mají opačný charakter, než zkouška ohybem a výsledné hodnoty mechanických vlastností pevnosti, tažnosti a meze kluzu. Čím větší rychlost tažení, tím menší počet krutů. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot zkoušky krutem od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 6, 8 a 10 m/s. Čím větší rychlost tažení, tím větší rozpětí hodnot. Na **obr. 50** si můžeme všimnout, že rozpětí hodnot je jednoznačně největší u rychlosti 10 m/s. Vypočtené hodnoty sice vykazují trend, ale rovněž je zde vliv rychlosti tažení díky velkému rozpětí naměřených hodnot statisticky nevýznamný.



**Obr. 50** Krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky krutem za jednotlivých rychlostí tažení

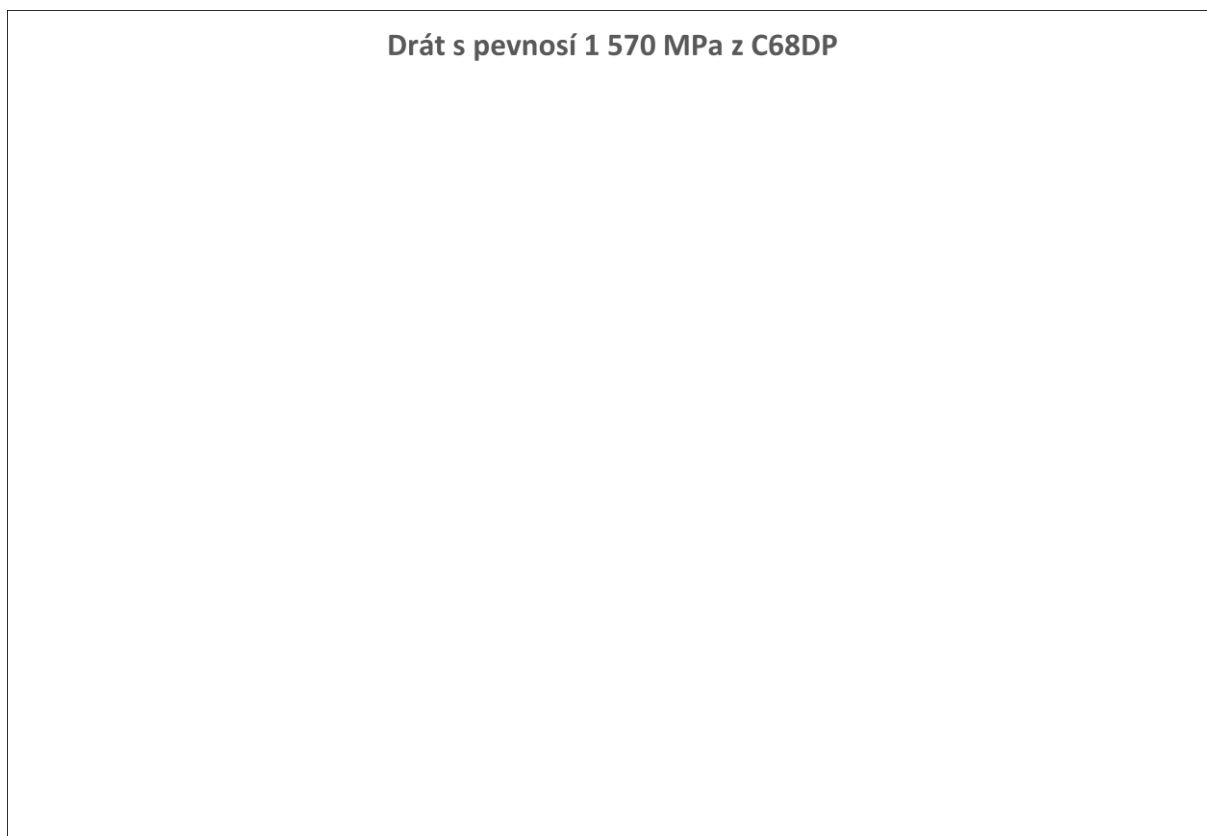
### 8.2.2 Data a popisná statistika únavových vlastností

V **tabulce 9** jsou uvedeny výsledky zkoušky únavy oceli jakosti C68DP. Jednotlivé počty cyklů zkušebního vzorku jsou přiřazeny k dané rychlosti tažení. Pro každou rychlost tažení byly také vypočítány statistické údaje jako jsou průměr, směrodatná odchylka, maximum, minimum a rozpětí. Všechny zkušební vzorky byly zkoušeny pod zatížením přibližně 32 kg/mm<sup>2</sup>. Podrobnější popis zkoušky únavy najdeme v **kapitole 7.2 Popis experimentu**.

**Tabulka 9** *Výsledky zkoušky únavy drátu jakosti C68DP*

Rychlost taž.	Vzorek	Počet cyklů	Průměr	Směr. odch.	Min.	Max.	Rozpětí
6 m/s	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
8 m/s	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
10 m/s	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

Pro lepší orientaci je na **obr. 51** znázorněn graf, kde je provedeno podrobnější porovnání průměrných hodnot, rozpětí, mediánů, horních a dolních hodnot počtu cyklů za jednotlivých rychlostí tažení.



**Obr. 51** Krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky únavy za jednotlivých rychlostí tažení

Když začneme porovnávat jednotlivé počty cyklů vzhledem k rychlosti tažení, tak se dostaneme k těmto závěrům.

Výsledné průměrné hodnoty počty cyklů vyznačené křížkem, vzhledem k rychlostem 6, 8 a 10 m/s klesají se zvyšující se rychlostí tažení. Čím větší rychlost tažení, tím menší počet cyklů. Rychlost tažení 10 m/s má sice o 6 cyklů více, než rychlost 8 m/s, ale tento rozdíl je téměř zanedbatelný. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot počtu cyklů od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 6, 10 a 8 m/s. Velikost rozpětí hodnot můžeme rozeznat podle znázorněného grafu, kde vzdálenost horního vousu (maxima) a spodního vousu (minima) krabice určuje celkové rozpětí. Na **obr. 51** si můžeme všimnout, že rozpětí hodnot je jednoznačně nejmenší u rychlosti 6 m/s. Znatelný rozdíl rychlosti tažení je pouze mezi nejnižší rychlostí (6 m/s) a dalšími rychlostmi.

## 8.3 Tažený drát z jakosti C86D2

### 8.3.1 Data a popisná statistika mechanických vlastností a zkoušek

V **tabulce 10** jsou uvedeny nejen výsledky mechanických vlastností tahové zkoušky, ale také zkoušky krutem a ohybem. Jednotlivé mechanické vlastnosti a zkoušky jsou přiřazeny k dané rychlosti tažení. Pro každou rychlost tažení byly vypočítány statistické údaje jako jsou průměr, směrodatná odchylka, maximum, minimum a rozpětí. Minimální požadované mechanické vlastnosti a zkoušky krutem a ohybem pro drát jakosti C86D2 s pevností 2 160 MPa najdeme v **tabulce 4 kapitola 7.1.2 Přehled mechanických vlastností použitých ocelí**.

Vzhledem k citlivosti údajů ŽDB Drátovny a.s. jsou naměřená data zveřejněna v samostatné výzkumné zprávě (původní DP) ŽDB Drátovny a.s. [32].

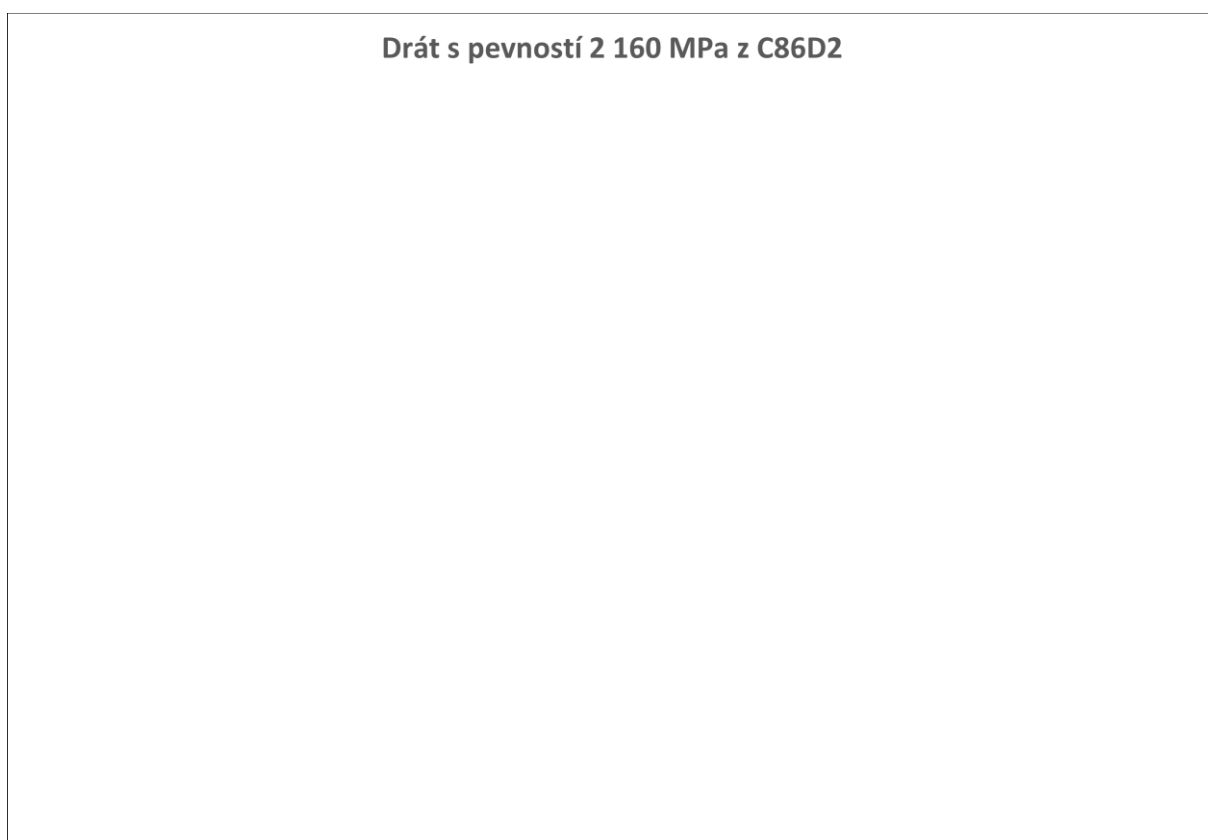
**Tabulka 10** *Výsledky mechanických vlastností a zkoušky krutem a ohybem u drátů z jakosti C86D2*

Vzorek	Rych. taž. (m/s)	d <sub>0,01</sub> (mm)	F <sub>m</sub> (N)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	A <sub>t</sub> (%)	N <sub>o</sub> (3.75)	N <sub>k</sub> (100·d)	Z (%)
1	6 m/s								
2									
3									
4									
5									
Průměr									
Sm. od.									
Min.									
Max.									
Rozpětí									
1	8 m/s								
2									
3									
4									
5									
Průměr									
Sm. od.									

Vzorek	Rych. taž. (m/s)	d <sub>0,01</sub> (mm)	F <sub>m</sub> (N)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	A <sub>t</sub> (%)	N <sub>o</sub> (3.75)	N <sub>k</sub> (100·d)	Z (%)
Min.									
Max.									
Rozpětí									
1	10 m/s								
2									
3									
4									
5									
Průměr									
Sm. od.									
Min.									
Max.									
Rozpětí									

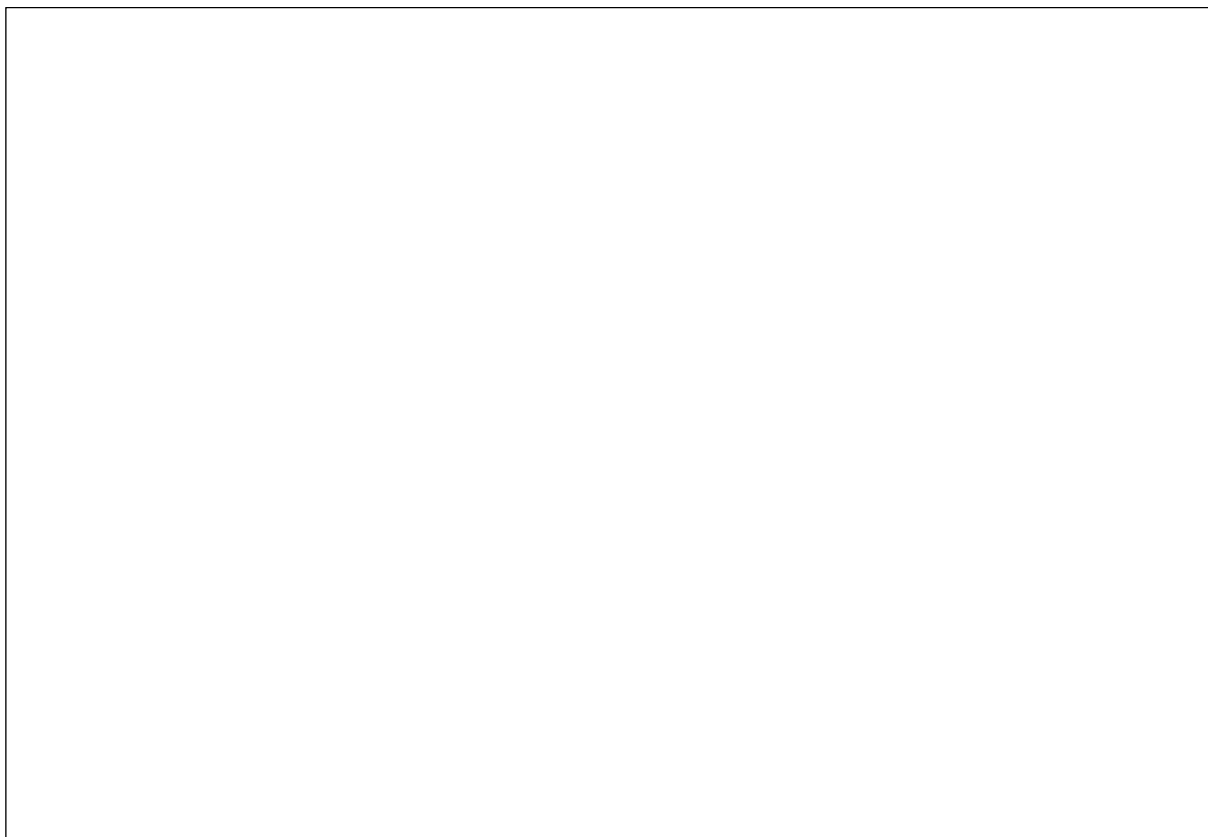
Z uvedených dat a vypočtených průměrných hodnot je zřejmé, že všechny uvedené hodnoty zkušebních vzorků taženého drátu jakosti C86D2 s pevností 2 160 MPa jsou vyhovující. Pro lepší orientaci jsou na **obr. 52, 53, 54, 55, 56 a 57** znázorněny grafy pro podrobnější porovnání průměrných hodnot, rozpětí, mediánů, horních a dolních hodnot mechanických vlastností a zkoušek za jednotlivých rychlostí tažení. Významnost krabicového grafu uvádím v **kapitole 8.1 Krabicový graf**. Když začneme porovnávat jednotlivé mechanické vlastnosti a zkoušky, tak se dostaneme k těmto závěrům.

Na **obr. 52** je zobrazen krabicový graf hodnot pevnosti pro jednotlivé rychlosti tažení. Výsledné průměrné hodnoty pevnosti  $R_m$  vyznačené křížkem, vzhledem k rychlostem tažení 6, 8 a 10 m/s mají lineární průběh. Čím větší rychlost tažení, tím větší pevnost. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot pevnosti od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 8, 6 a 10 m/s. Velikost rozpětí hodnot můžeme rozeznat podle znázorněného grafu, kde vzdálenost horního vousu (maxima) a spodního vousu (minima) krabice určuje celkové rozpětí. Rychlost tažení nemá na hodnoty pevnosti znatelný vliv jako tomu bylo u předchozí oceli. Krabice hodnot rychlostí 8 a 10 m/s se vzájemně překrývají.



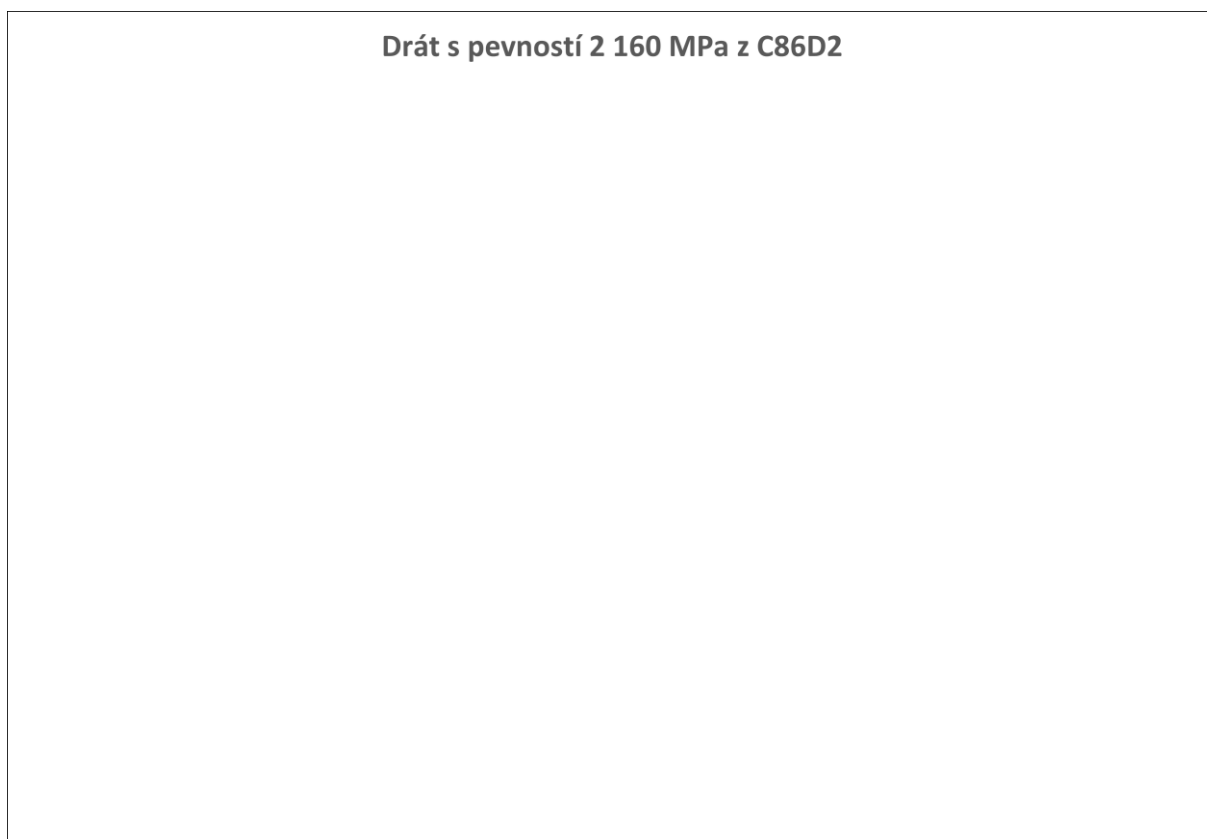
**Obr. 52** Krabicový graf vypočtených hodnot pevnosti za jednotlivých rychlostí tažení

Na **obr. 53** je zobrazen bodový graf vypočtených hodnot pevnosti v závislosti na rychlosti tažení 6, 8 a 10 m/s. V grafu je vyznačena regresní přímka, která určuje lineární závislost hodnot pevnosti k rychlosti tažení. Dále je zobrazen vypočítaný koeficient determinace  $R^2 = 0,5065$ . Závěrem lze konstatovat, že se jedná o přímou lineární závislost regresní přímky.



**Obr. 53** Bodový graf vypočtených hodnot pevnosti za jednotlivých rychlostí tažení

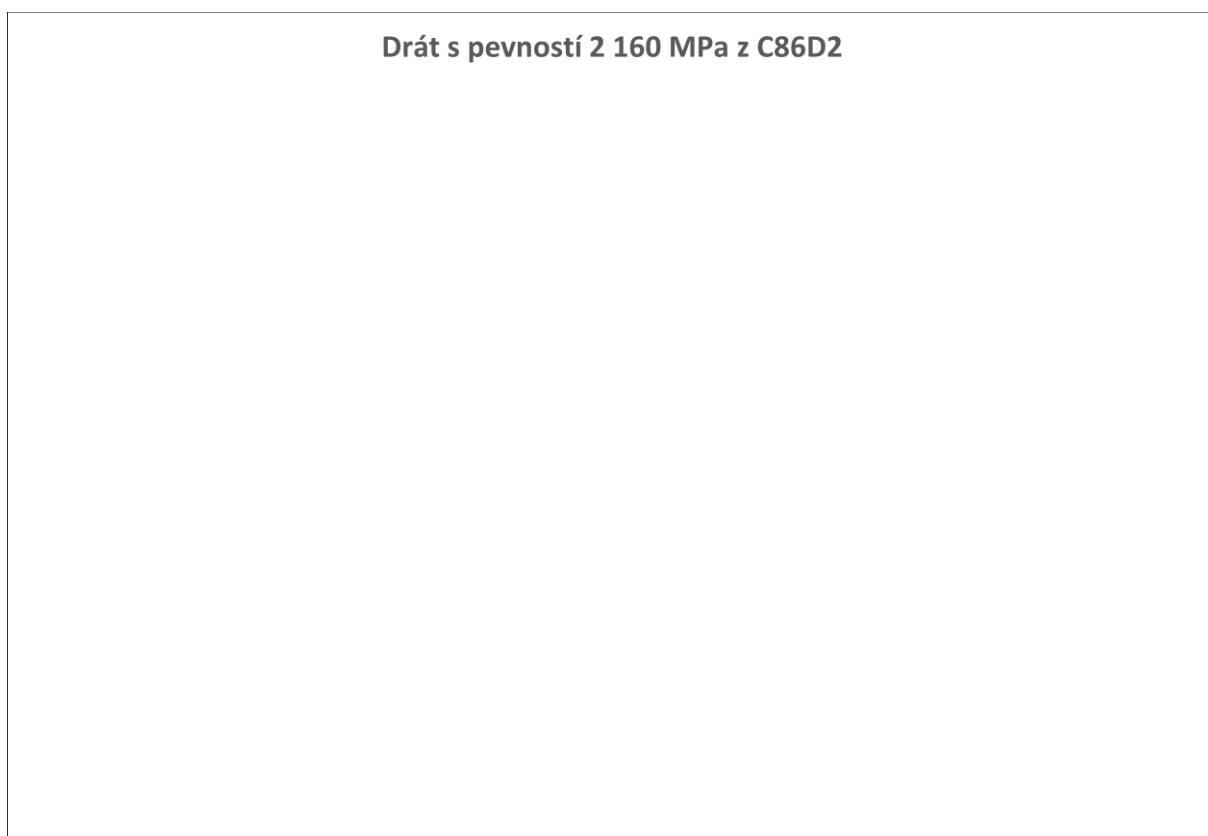
Průměrné hodnoty celkové tažnosti  $A_t$  vyznačené křížkem mají překvapivě stejný charakter jako průměrné hodnoty pevnosti. Čím větší rychlost tažení, tím větší tažnost. Hodnoty tažnosti jsou u rychlostí tažení 8 m/s a 10 m/s stejné. Obecný předpoklad vzhledem k výsledné pevnosti byl stejný jako u předchozího drátu z oceli C68DP s finální pevností 1 570 MPa spíše opačný, čím větší rychlost tažení, tím menší tažnost. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot tažnosti od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 10, 8 a 6 m/s. Čím větší rychlost tažení, tím menší rozpětí hodnot tažnosti. Na **obr. 54** si můžeme všimnout, že rozpětí hodnot je jednoznačně největší u rychlosti 6 m/s. Vliv rychlosti tažení je z důvodu velkého rozpětí hodnot pro rychlost 6 m/s neprůkazný.



**Obr. 54** Krabicový graf vypočtených hodnot tažnosti za jednotlivých rychlostí tažení

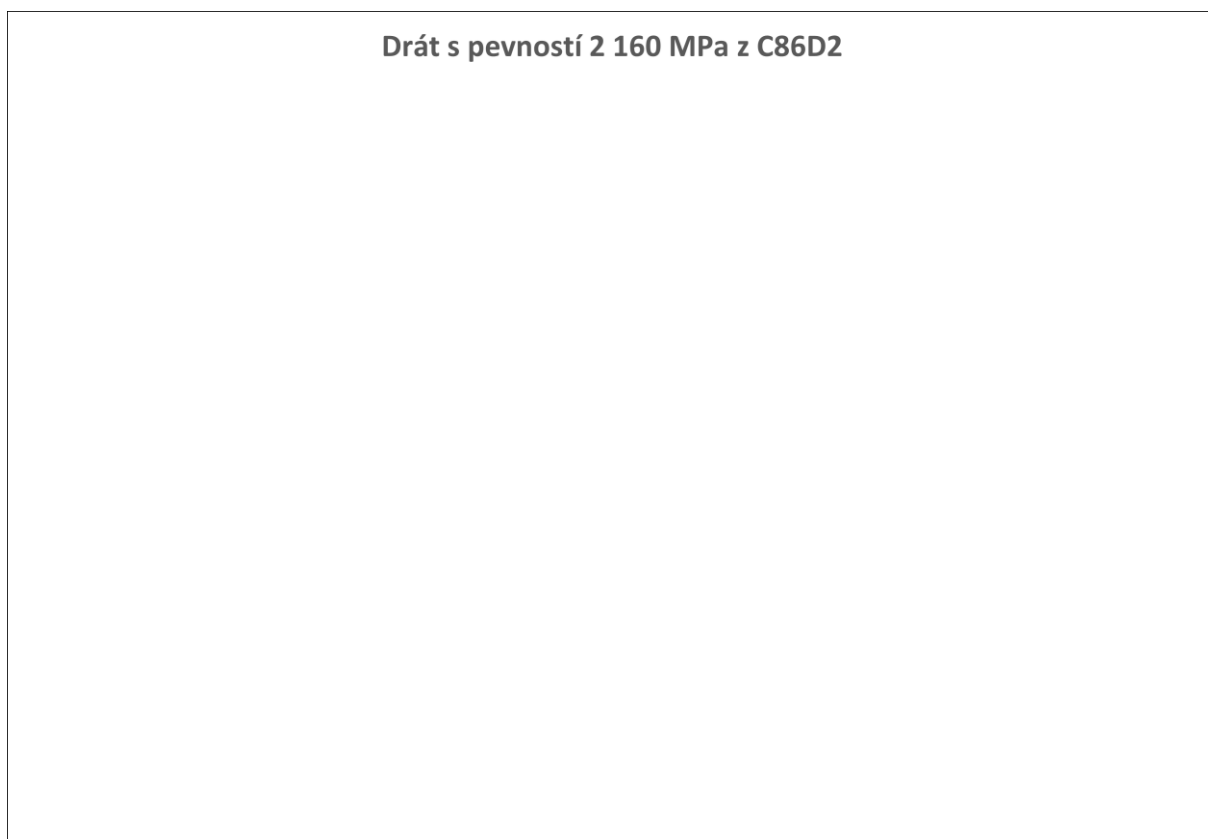


Průměrné hodnoty meze kluzu vyznačené křížkem nevykazují žádnou závislost. Nejvyšší průměrná hodnota meze kluzu je u rychlosti tažení 8 m/s, následuje rychlost 10 a 6 m/s. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot meze kluzu od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 10, 8 a 6 m/s. Čím větší rychlost tažení, tím menší rozpětí hodnot. Na **obr. 55** si můžeme všimnout, že rozpětí hodnot je jednoznačně největší u rychlosti 6 m/s. Vliv rychlosti tažení je z důvodu velkého rozpětí hodnot pro rychlost 6 m/s neprůkazný.



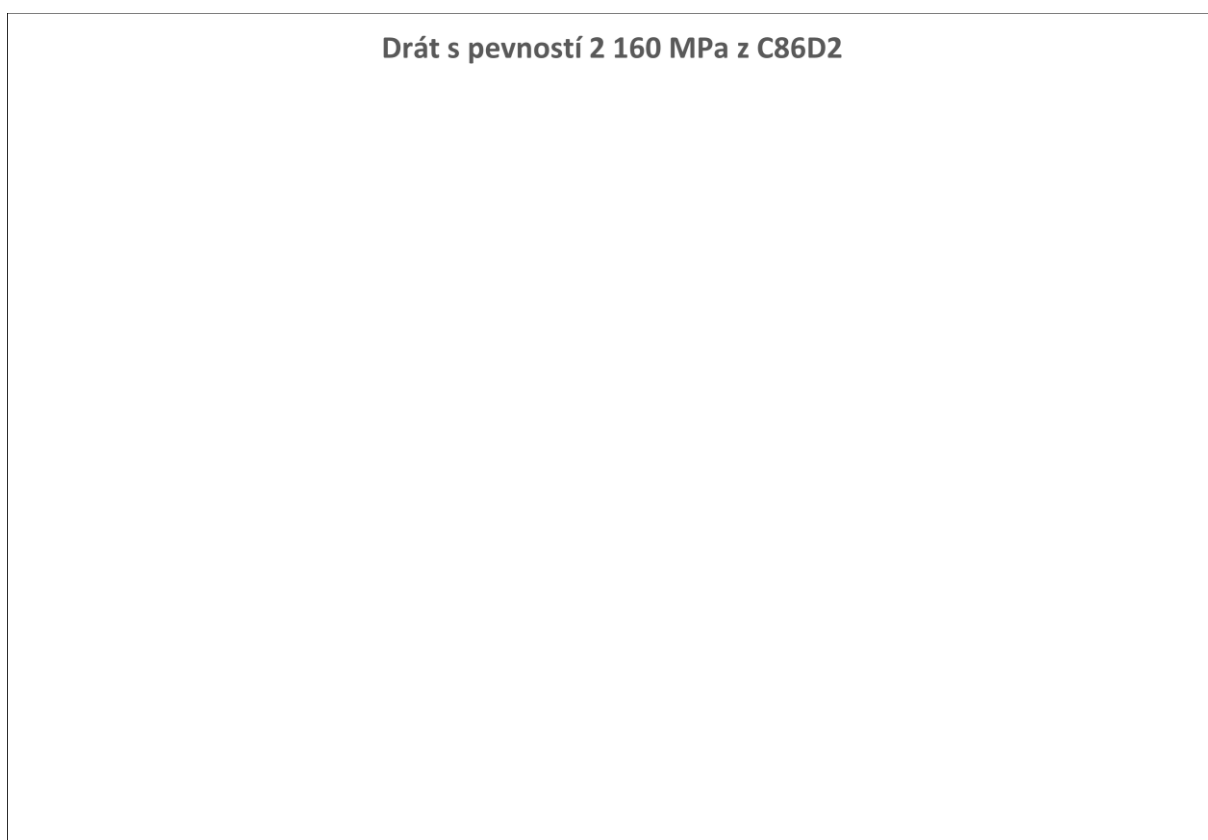
**Obr. 55** Krabicový graf vypočtených hodnot meze kluzu za jednotlivých rychlostí tažení

Průměrné hodnoty zkoušky ohybem  $N_o$  mají téměř stejný charakter jako průměrné hodnoty meze kluzu, kdy hodnoty nevykazují žádnou závislost. Nejvyšší průměrná hodnota zkoušky ohybem je u rychlosti tažení 8 m/s, následuje rychlost 10 a 6 m/s. U průměrných hodnot zkoušky počtu ohybů do lomu je rozdíl u všech rychlostí tažení téměř zanedbatelný. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot zkoušky ohybem od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 10, 8 a 6 m/s. Čím větší rychlost tažení, tím menší rozpětí hodnot. Hodnoty rozpětí jsou taky zanedbatelné, kdy je rozdíl pouze v desetinných místech. Na **obr. 56** si můžeme všimnout krabicového grafu vypočtených hodnot zkoušky ohybem za jednotlivých rychlostí tažení. Vliv rychlosti tažení je neprůkazný.



**Obr. 56** *Krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky ohybem za jednotlivých rychlostí tažení*

Průměrné hodnoty zkoušky krutem  $N_k$  mají stejný charakter, jako mechanické vlastnosti pevnosti a tažnosti. Čím větší rychlost tažení, tím větší počet krutů. Nicméně rozdíl průměrných hodnot počtu krutů vzhledem k rychlosti tažení, je téměř zanedbatelný. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot zkoušky krutem od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 8, 6 a 10 m/s. Hodnoty rozpětí zkoušky počtu krutů vzhledem k rychlosti tažení nevykazují žádnou závislost. Na **obr. 57** si můžeme všimnout, že rozpětí hodnot je jednoznačně nejmenší u rychlosti 8 m/s. Vliv rychlosti tažení je neprůkazný hlavně díky velkému rozpětí hodnot u rychlostí 6 a 10 m/s.



**Obr. 57** Krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky krutem za jednotlivých rychlostí tažení

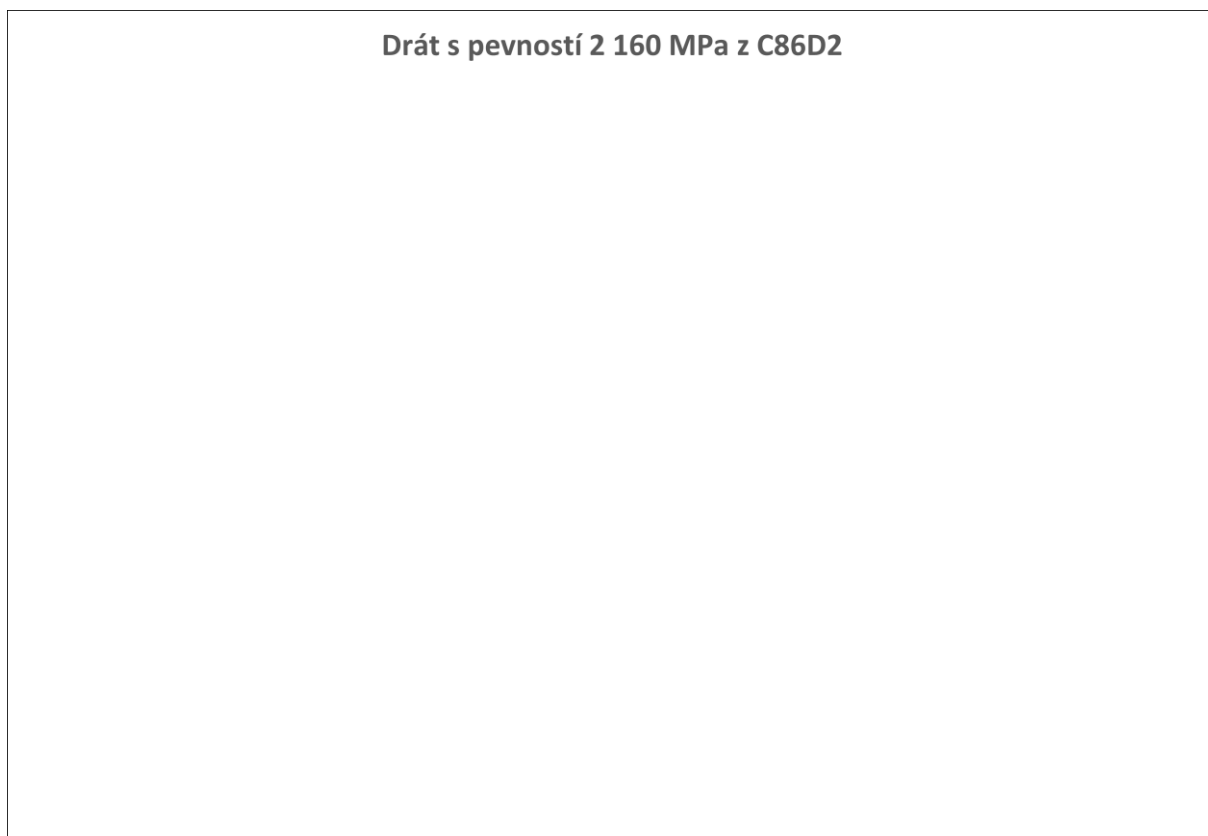
### 8.3.2 Data a popisná statistika únavových vlastností

V **tabulce 11** jsou uvedeny výsledky zkoušky únavy drátu jakosti C86D2. Jednotlivé počty cyklů zkušebního vzorku jsou přiřazeny k dané rychlosti tažení. Pro každou rychlost tažení byly také vypočítány statistické údaje jako jsou průměr, směrodatná odchylka, maximum, minimum a rozpětí. Všechny zkušební vzorky byly zkoušeny pod zatížením přibližně 32 kg/mm<sup>2</sup>. Podrobnější popis zkoušky únavy najdeme v **kapitole 7.2 Popis experimentu**.

**Tabulka 11** *Výsledky zkoušky únavy drátu jakosti C86D2*

Rychlost taž.	Vzorek	Počet cyklů	Průměr	Směr. odch.	Min.	Max.	Rozpětí
6 m/s	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
8 m/s	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
10 m/s	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

Pro lepší orientaci je na **obr. 58** znázorněn graf, kde je provedeno podrobnější porovnání průměrných hodnot, rozpětí, mediánů, horních a dolních hodnot počtu cyklů za jednotlivých rychlostí tažení.



**Obr. 58** Krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky únavy za jednotlivých rychlostí tažení

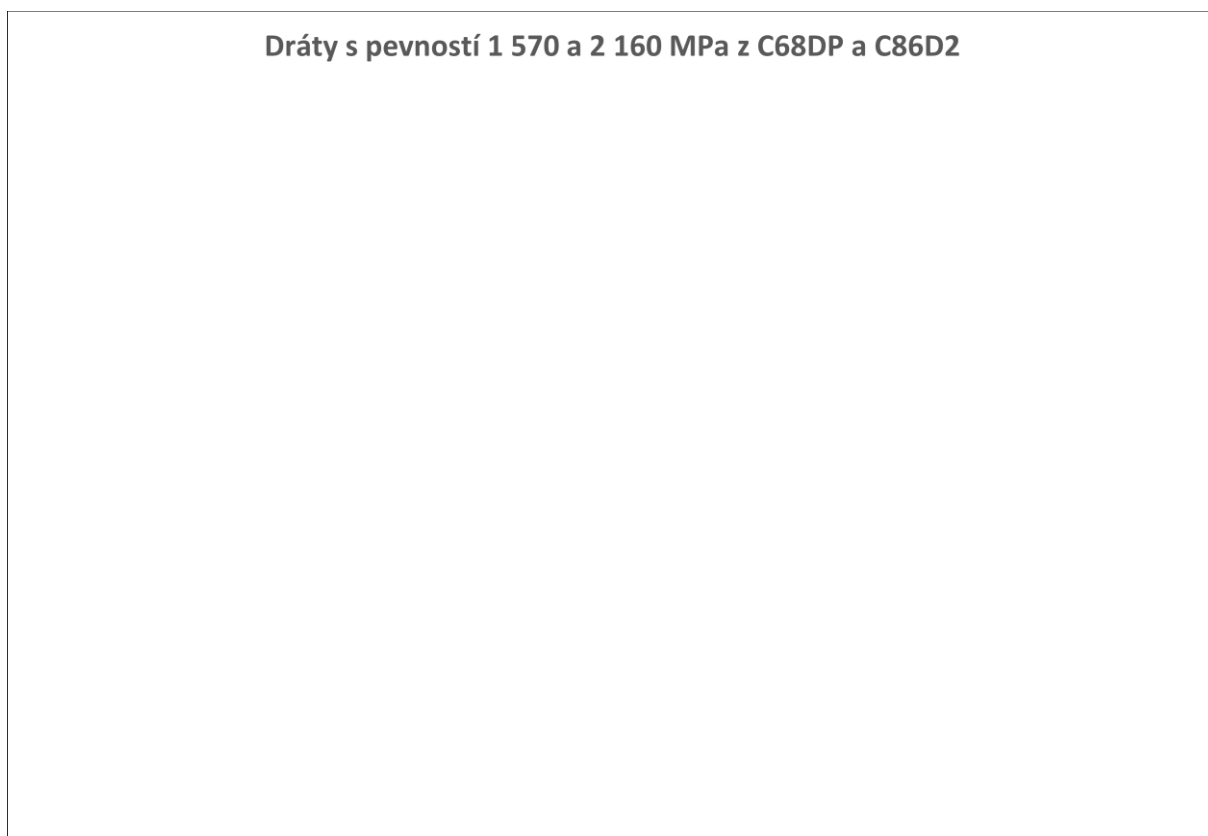
Když začneme porovnávat jednotlivé počty cyklů vzhledem k rychlosti tažení, tak se dostaneme k těmto závěrům.

Výsledné průměrné hodnoty počtu cyklů vyznačené křížkem, vzhledem k rychlostem 6, 8 a 10 m/s nevykazují žádnou závislost. Nicméně nejvyšší počet cyklů dosáhla rychlost 6 m/s. Pokud vyhodnotíme celkové rozpětí hodnot počtu cyklů od nejmenšího po největší, tak dostáváme následující pořadí 6, 8 a 10 m/s. Čím větší rychlost tažení, tím větší rozpětí hodnot počtu cyklů. Velikost rozpětí hodnot můžeme rozeznat podle znázorněného grafu, kde vzdálenost horního vousu (maxima) a spodního vousu (minima) krabice určuje celkové rozpětí. Na **obr. 58** si můžeme všimnout, že rozpětí hodnot je jednoznačně nejmenší u rychlosti 6 m/s. Vliv rychlosti tažení k výsledným počtům cyklů je neprůkazný.

## 8.4 Srovnání mezi jakostmi C68DP a C86D2

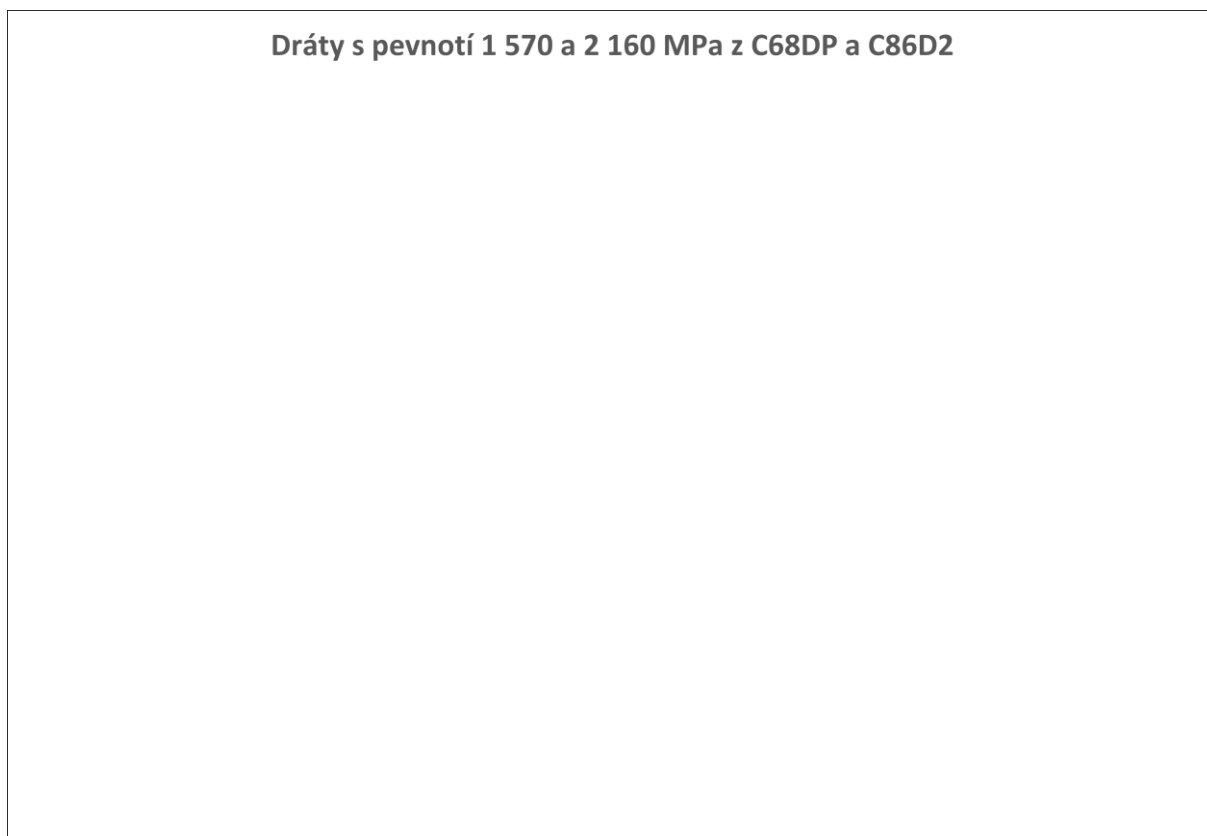
Srovnáním výše uvedených drátů jakostí C68DP a drátů jakosti z C86D2 dostáváme grafy, které jsou zobrazeny na **obr. 59, 60 a 61**. Pro podrobnější porovnání jsou v grafech zobrazeny průměrné hodnoty, rozpětí, mediány, horní a dolní hodnoty zkoušek za jednotlivých rychlostí tažení. Když začneme porovnávat jednotlivé zkoušky (ohybem, krutem a zkoušku únavy) dvou rozdílných jakostí ocelí, tak se dostaneme k těmto závěrům.

Srovnáním drátů z obou jakostí je zřejmé, že drát z C68DP vykazuje pro všechny rychlosti tažení větší počet průměrných hodnot ohybů do lomu  $N_o$ , než drát jakost C86D2. Vliv rychlosti tažení mezi jednotlivými jakostmi je patrný pro všechny rychlosti. Na **obr. 59** je zobrazen krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky ohybem  $N_o$  dvou zkoušených jakostí pro jednotlivé rychlosti tažení.



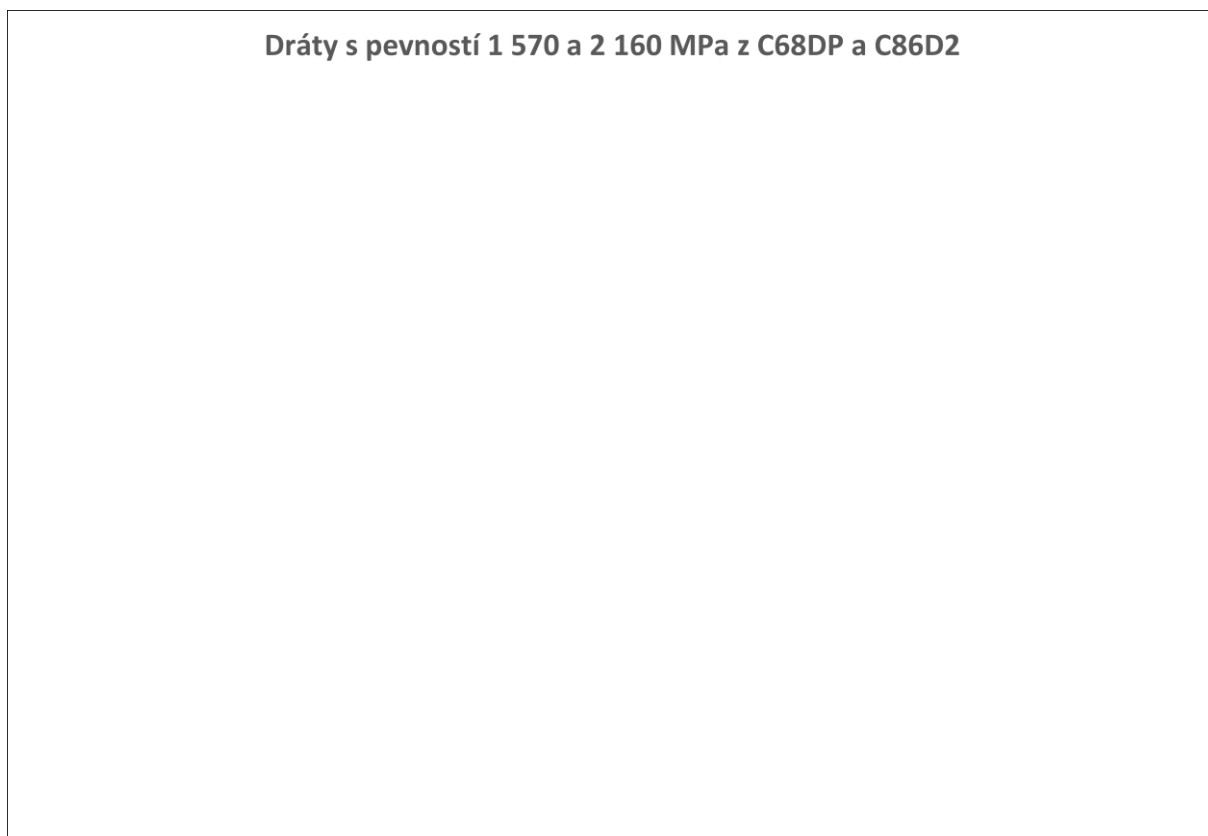
**Obr. 59** *Krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky ohybem jednotlivých rychlostí tažení pro dráty jakostí C68DP a C86D2*

Na **obr. 60** je zobrazen krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky krutem dvou jakostí pro jednotlivé rychlosti tažení. Porovnáním drátů z obou jakostí je zřejmé, že jakost C68DP vykazuje pro všechny rychlosti tažení větší počet průměrných hodnot krutů do lomu  $N_k$ , než jakost C86D2. Vliv rychlosti tažení mezi jednotlivými jakostmi je patrný ve všech rychlostech tažení.



**Obr. 60** *Krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky krutem jednotlivých rychlostí tažení pro dráty jakostí C68DP a C86D2*

Na **obr. 61** je zobrazen krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky únavy dvou jakostí jednotlivých rychlostí tažení. Porovnáním drátů z obou jakostí je zřejmé, že jakost C68DP vykazuje ve všech rychlostech tažení menší počet průměrných hodnot cyklů únavy do lomu. Vliv rychlosti tažení mezi jednotlivými jakostmi je patrný pouze v rychlostech 6 a 10 m/s. U rychlosti 8 m/s se krabice grafu vzájemně překrývají.



**Obr. 61** *Krabicový graf vypočtených hodnot zkoušky únavy jednotlivých rychlostí tažení pro dráty jakostí C68DP a C86D2*



## 9 Závěr a provozní doporučení

### 9.1 Drát jakosti C68DP s pevností 1 570 MPa

Provedený experiment u jakosti drátu C68DP s pevností 1 570 MPa vedl k následujícím zjištěním a závěrům.

Sledované mechanické vlastností jako je pevnost, tažnost, mez kluzu a u zkoušek počtu cyklů do lomu, ohybem a krutem signalizují závislost pouze hodnoty pevnosti  $R_m$ . Se zvyšující se rychlosti tažení se zvyšují průměrné hodnoty pevnosti. Z grafů celkové tažnosti  $A_t$  vyplývá, že vliv rychlosti tažení výrazněji neovlivňuje celkovou tažnost  $A_t$ . Hodnoty tažnosti vykazují mírný trend, kdy se zvyšující se rychlosti tažení se zvyšují průměrné hodnoty tažnosti. Hodnoty meze kluzu  $R_e$  signalizují vliv rychlosti tažení pouze mezi rychlostmi (6 m/s) a dalšími rychlostmi. Průměrné hodnoty meze kluzu  $R_e$  se zvyšují pouze od rychlosti 6 m/s do rychlosti 8 m/s následující rychlost tažení 10 m/s vykazuje téměř stejnou hodnotu jako rychlost tažení 8 m/s. U hodnot zkoušky ohybem  $N_o$  vliv rychlosti tažení nesignalizuje závislost a u rychlosti 10 m/s vykazují hodnoty větší rozpětí hodnot. Průměrné hodnoty zkoušky ohybem  $N_o$  vykazují u rychlosti tažení 6 a 8 m/s téměř stejnou hodnotu, ale u následující rychlosti tažení 10 m/s se tato hodnota jasně zvyšuje. U hodnot zkoušky krutem  $N_k$  vypočtené průměrné hodnoty vykazují trend, kdy čím větší rychlost tažení, tím menší počet krutů. Rovněž rychlost 10 m/s vykazuje vyšší rozpětí hodnot.

Hodnoty únavových vlastností vykazují největší počet cyklů při nejmenší rychlosti 6 m/s. Dále hodnoty počtu cyklů klesají se zvyšující se rychlostí tažení. Čím větší rychlost tažení, tím menší počet cyklů. Rychlost tažení 10 m/s měla sice o 6 cyklů více, než rychlost 8 m/s, ale tento rozdíl je téměř zanedbatelný. Rychlost 6 m/s zároveň vykazovala nejmenší rozpětí hodnot. Výraznější rozdíl rychlosti tažení je pouze mezi nejnižší rychlostí (6 m/s) a dalšími rychlostmi.

### 9.2 Drát jakosti C86D2 s pevností 2 160 MPa

Provedený experiment u drátu jakosti C86D2 s pevností 2 160 MPa vedl k následujícím zjištěním a závěrům.

U hodnot mechanických vlastností a zkoušek jako jsou pevnost, tažnost, mez kluzu a u zkoušek počtu cyklů do lomu, ohybem a krutem jsme zjistili, že hodnoty pevnosti  $R_m$  vykazují lineární závislost. Čím větší rychlost tažení, tím větší pevnost. Vliv rychlosti tažení u hodnot tažnosti  $A_t$  je neprůkazný z důvodu velkého rozpětí hodnot u rychlosti 6 m/s. Průměrné hodnoty tažnosti  $A_t$  se zvyšují pouze od rychlosti 6 m/s do rychlosti 8 m/s. Následující rychlost tažení 10 m/s vykazuje stejnou průměrnou hodnotu jako rychlost tažení 8 m/s. U hodnot meze kluzu  $R_e$  není vliv rychlosti tažení významný a to hlavně díky velkému rozpětí hodnot pro rychlost 6 m/s. Průměrné hodnoty meze kluzu  $R_e$  nevykazují žádnou závislost. U hodnot zkoušky ohybem  $N_o$  není vliv rychlosti tažení významný. Rozdíl průměrných hodnot počtu ohybů do lomu  $N_o$  je nevýrazný. U hodnot zkoušky krutem  $N_k$  je vliv rychlosti tažení díky velkému rozpětí hodnot u rychlostí 6 a 10 m/s nevýznamný. Rovněž rozdíl průměrných hodnot počtu krutů do lomu  $N_k$  je nevýrazný.

Hodnoty únavových vlastností vykazovaly největší počet cyklů a zároveň nejmenší rozpětí hodnot při nejmenší rychlosti tažení 6 m/s. Dále nevykazovaly hodnoty počtu cyklů žádnou závislost. U hodnot počtu cyklů je vliv rychlosti tažení nevýznamný.

### 9.3 Srovnání drátů jakostí C68DP a C86D2

Srovnáním drátů jakosti C68DP s finální pevností 1570 MPa a drátů jakosti C86D2 s finální pevností 2160 MPa se dostáváme k následujícím zjištěním a závěrům.

U průměrných hodnot počtu krutů a ohybů do lomu vykazuje drát z jakosti C68DP vyšší hodnoty než drát jakosti C86D2. U zkoušky ohybem a krutem je vliv rychlosti tažení mezi jednotlivými jakostmi znatelný ve všech rychlostech tažení. U zkoušky únavy je vliv rychlosti tažení mezi jednotlivými jakostmi znatelný pouze v rychlostech 6 a 10 m/s. Průměrné hodnoty počtu cyklů drátu jakosti C68DP vykazují nižší hodnoty ve všech rychlostech tažení

### 9.4 Doporučená rychlost tažení

Pro zvýšení hodnot pevnosti v tahu  $R_m$ , bych doporučil nejvyšší zkoušenou rychlost tažení, tedy 10 m/s. U zkoušených drátů z obou jakostí C68DP a C86D2 byla prokázána pozitivní závislost pevnosti  $R_m$  na rychlosti tažení. U ostatních sledovaných mechanických vlastností včetně ohybů a krutů nebyla závislost na rychlosti tažení zjištěna. Nicméně většina

sledovaných mechanických vlastností a zkoušek vykazovala příznivější výsledky za vyšších rychlostí tažení, což je také příznivější vzhledem k produktivitě práce.

Pro dosažení vyšší odolnosti proti únavě bych doporučil zkoušenou rychlost 6 m/s. U drátů z obou ocelí C68DP a C86D2 byl dosažen největší počet cyklů do lomu a zároveň nejmenší rozpětí naměřených hodnot právě u rychlosti 6 m/s.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] MARCOL, J. a kolektiv, *Tažený ocelový drát 1. a 2. díl*. Bohumín: ŽDB a. s., 1996. 500 s.
- [2] ZÁLEŠÁK, Zdeněk., *Vlastnosti tyčové oceli tažené z tepelně zpracovaných tyčí a svitků*. Ostrava, 2019. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [3] KENDRA, Juraj., *Vliv geometrie průvltaku na mechanické vlastnosti taženého patentovaného drátu*. Ostrava, 2014. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [4] *Železářny a drátovny Bohumín*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelez%C3%A1rny\\_a\\_dr%C3%A1tovny\\_Bohum%C3%ADn](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelez%C3%A1rny_a_dr%C3%A1tovny_Bohum%C3%ADn)
- [5] HISTORIE. *ŽDB drátovna* [online]. Bohumín [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.zdb.cz/onas-all.php#historie>
- [6] FABÍK, Richard. *Studijní opora. Vybrané kapitoly z tváření kovů kapitoly. 1-10*. [online]. 2008. [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: <http://www.fmmi.vsb.cz/cs/katedry-a-pracoviste/633/vyukove-opory-katedry/index.html>.
- [7] KLIBER, J. *Základy tváření kovů*. 3 vydání. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2008, 278 s. ISBN 978-80-248-1794-1.
- [8] LUKSZA, J., SADOK, L., *Wybrane zaqadnienia z ciaqarstwa*. Kraków: Akademia Górniczo-hutnicza Im. S. Staszica w Krakowie, 1983. 185 s.
- [9] BAČA, M., MORAVEC, E., *Průvltaky pro tažení ocelových drátů*. Hutnické aktuality. Dobrá u Frýdku-Místku: VÚHŽ, účelová organizace, 1984. 48 s. ISSN 0322-85-25.
- [10] PUŠKÁR, A.; GOLOVIN, S. *Kumulácia poškodenia v procese únavy*. 1. Vydání. Bratislava: VEDA, 1981. 264 s.
- [11] FABÍK, Richard, NÉTEK, V., *Vliv geometrie průvltaku na homogenitu deformace a tažnou sílu při tažení drátu*. - *Hutnické listy. Metallurgical journal*. Roč. 64, 2011, č.4. s. 38-41.

- [12] Stránky Politechniky Wroclawské. [online]. 2014. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <http://www.metalplast.pwr.wroc.pl/pliki/lab5.pdf>.
- [13] Ernst Koch GmbH [online]. Ihmert, 2018 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <http://www.koch-ihmert.de/>
- [14] ŽÍDEK, M., DĚDEK V., SOMMER B., *Tváření oceli*. 1 vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1988, 520 s.
- [15] PETKOVÁ, V. a kol. *Tribotechnika v teorii a praxi*. Vydavatelství VIENALA pro TU Košice. 2012 s. 366
- [16] KNEBELKAMP, H., a kol., In: *Herstellung von Stahldraht*. Teil 1. VerlagStahleisen M.B.H. Düsseldorf, 1969, s. 188
- [17] WHITTON P.W., J.Inst. Metals 86, 1958 s. 417/21
- [18] WRIGHT, R. N., *Wire technology: process engineering and metallurgy*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2011, xv, 320p. ISBN 978-012-3820-921.
- [19] MARCOL J.: Tažený ocelový drát pro vaše užití, rok 1998.
- [20] CHAJN I.I., Teorija i praktika fosfatirovanja, *Chimia*, 1973
- [21] SHEMENSKI R.M., *Wire and Cable College, Properties of Steel Wire*, Atlanta, Georgia, USA, Interwire 2001
- [22] KLESNIL, Mirko a Petr LUKÁŠ. *Fatigue of Metallic Materials*. 3. rev. ed. Prague: Academia, 1992.
- [23] LAUSCHMANN, Hynek., *Mezní stavy I: únava materiálu*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03671-6.
- [24] Co stálo za smrtí cestujících v letadle De Havilland Comet? Zoom. *iPrima* [online]. Praha: FTV Prima spol., 2019 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://zoommagazin.iprima.cz/novinky/zajimavosti/video-co-stalo-za-smrti-cestujicich-v-letadle-de-havilland-comet>
- [25] PTÁČEK, L. et. al. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2003. 520 s. ISBN 80-7204-283-1.

- [26] VLACH, B., *Únava materiálu* [online]. 2007, poslední revize 31.1.2007 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/08a%20-%20unava1.doc>.
- [27] VĚCHET, Stanislav, Otakar BOKŮVKA a Jan KOHOUT. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-910-5.
- [28] PANTĚLEJEV, L. *Únava kovových materiálů* [online]. 2005, poslední revize 24.11.2005 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.doc>.
- [29] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava: Alfa, 1985.
- [30] PLUHAŘ, J., PUŠKÁR, A., KOUTSKÝ, J.; et al. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha: SNTL, 1987.
- [31] STEPHEN, R. I., *Fatigue Design Handbook*. Iowa: SAE International, 1977. 496s.
- [32] Interní materiály ŽDB Bohumín
- [33] ČSN EN 10264-2. *Ocelové dráty a výrobky z drátů – Ocelové dráty na lana: Část 2: Dráty z nelegovaných ocelí tažené za studena na výrobu lan pro všeobecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [34] LASÁK, Pavel. Krabicový graf: Boxplot – Excel. *Jak na excel: Microsoft EXCEL ... at' pracuje za Vás ...* [online]. 2020 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://office.lasakovi.com/excel/grafy/krabicovy-graf-boxplot-excel/>
- [35] TOŠENOVSKÝ, Josef. *Základy statistického zpracování dat*. 2. vydání. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3733-8.
- [36] *Úvod do regresní analýzy*. StatSoft [online]. Praha [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: [http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014\\_26\\_03\\_StatSoft\\_Uvod\\_do\\_regresni\\_analyzy.pdf](http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014_26_03_StatSoft_Uvod_do_regresni_analyzy.pdf)